

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LOS ELEMENTOS
DE FLUJO LAMINAR (*LFEs*) A LA VERIFICACIÓN METROLÓGICA DE
MEDIDORES DE GAS RESIDENCIAL**

JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2006

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LOS ELEMENTOS
DE FLUJO LAMINAR (*LFEs*) A LA VERIFICACIÓN METROLÓGICA DE
MEDIDORES DE GAS RESIDENCIAL**

JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR

**Monografía para Optar al Título de
Especialista en Ingeniería del Gas**

Director

HENRY ABRIL BLANCO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2006

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS.....	3
1.1. REGIMENES DE FLUJO.....	3
1.2. FLUJO VISCOZO A TRAVÉS DE CONDUCTOS.....	5
1.3. ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR (<i>LFEs</i>).....	7
1.4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN.....	10
1.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	14
1.6. CONCEPTOS DE APLICACIÓN.....	20
1.7. DISEÑOS DE ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR.....	22
1.8. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.....	27
1.9. CONSIDERACIONES DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN.....	30
1.10. VISCOSIDAD DEL GAS.....	34

CAPÍTULO II

2. TECNOLOGÍAS USADAS EN COLOMBIA PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS RESIDENCIALES.....	39
2.1. MEDIDOR SECO.....	39
2.2. CÁMARAS HÚMEDAS.....	41
2.3. TOBERAS DE FLUJO CRÍTICO (<i>BOQUILLAS SÓNICAS</i>).....	43
2.4. CAMPANA GASOMÉTRICA.....	46
2.5. OTROS MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.....	48
2.6. RESUMEN DE SISTEMAS DE CALIBRACIÓN.....	49

CAPÍTULO III

3. INGENIERÍA BÁSICA Y CONCEPTUAL.....	50
3.1. REQUISITOS LEGALES.....	50
3.2. REQUISITOS TÉCNICOS.....	51
3.2.1. Normatividad.....	51
3.2.2. Análisis de la normatividad.....	51
3.2.3. Consideraciones de diseño.....	54
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL PATRÓN.....	54
3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA.....	58
3.4.1. Presión.....	58
3.4.2. Temperatura.....	58
3.4.3. Condiciones ambientales.....	59
3.5. CARACTERÍSTICAS DEL LOCAL DE CALIBRACIONES.....	60
3.6. CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE ENSAYOS.....	61
3.7. INGENIERÍA BÁSICA Y CONCEPTUAL.....	61
3.7.1. Selección del patrón.....	61
3.7.2. Selección de la instrumentación secundaria.....	67

3.7.2.1.	Presión	67
3.7.2.2.	Temperatura.....	68
3.7.2.3.	Condiciones ambientales.....	69
3.7.2.4.	Equipos y material adicional	69
3.7.3.	Configuración del patrón y operación	70
3.7.4.	Aseguramiento metrológico	73

CAPÍTULO IV

4.	COSTOS Y COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS	76
4.1.	COSTOS PATRÓN BASADO EN LFEs	76
4.2.	COSTOS DE OTRAS TECNOLOGÍAS	78
4.3.	COMPARACIÓN.....	79

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
5.1.	CONCLUSIONES.....	81
5.2.	RECOMENDACIONES	82

REFERENCIAS	83
--------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	85
---------------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Viscosidad a 1 atm para temperaturas de 10 a 35°C.....	36
Tabla 2. Fracción de cambio en la viscosidad por variación en la presión atmosférica.....	36
Tabla 3. Resolución típica de los medidores secos comerciales	39
Tabla 4. Resumen de tecnologías de calibración.....	49
Tabla 5. Laboratorios acreditados para calibración de medidores de gas residenciales.....	49
Tabla 6. Resumen de requisitos metrológicos estipulados en documentos técnicos.....	51
Tabla 7. Alcance de medición de los medidores residenciales usados en Colombia	55
Tabla 8. Parámetros críticos para el patrón de medición.....	57
Tabla 9. Requisitos asociados a los instrumentos de presión	58
Tabla 10. Requisitos asociados a los instrumentos de temperatura.....	59
Tabla 11. Requisitos asociados a la medición de condiciones ambientales	60
Tabla 12. Condiciones del local de calibraciones.....	60
Tabla 13. Alcance de medición de los LFEs patrón seleccionados.....	62
Tabla 14. Características metrológicas del sistema de medición patrón	64
Tabla 15. Dimensiones y pesos de los LFEs y la consola	66
Tabla 16. Características de los instrumentos de presión (<i>LFEs</i>).....	67
Tabla 17. Características de los instrumentos de presión (<i>medidores en prueba</i>)	68
Tabla 18. Características de los instrumentos de temperatura (<i>LFEs</i>)	68
Tabla 19. Características de los instrumentos de temperatura (<i>medidores en prueba</i>)	68
Tabla 20. Características del instrumento de medición de condiciones ambientales	69
Tabla 21. Equipos y material adicional necesarios para el patrón.....	69
Tabla 22. Costo de equipos y accesorios exclusivos al patrón de LFEs.....	76
Tabla 23. Costo del aseguramiento metrológico exclusivo al patrón de LFEs	76
Tabla 24. Costo de equipos y accesorios comunes a cualquier patrón.....	77
Tabla 25. Costo del aseguramiento metrológico elementos comunes a cualquier patrón...	77
Tabla 26. Costo de un sistema patrón basado en cámaras húmedas.....	78
Tabla 27. Comparación entre las tecnologías	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Experimentos de Reynolds	3
Figura 2. Perfil de velocidades de un flujo laminar.....	4
Figura 3. Perfil de velocidades de un flujo turbulento	4
Figura 4. Flujo laminar a través de una sección de tubería circular.....	6
Figura 5. Elementos de Flujo Laminar (<i>LFEs</i>).....	8
Figura 6. Analogía de los LFEs con la ley de Ohm	10
Figura 7. Diagrama esquemático del funcionamiento de un LFE	12
Figura 8. Desempeño ideal de un LFE	14
Figura 9. Desempeño real de un LFE	15
Figura 10. LFEs con sistema electrónico de adquisición y procesamiento de datos.....	19
Figura 11. Diseños y configuraciones comerciales típicas de LFEs	23
Figura 12. Diseño tipo matriz con tomas de presión diferencial tipo Pitot	24
Figura 13. Sistema de medición basado en LFEs de alta presión diferencial	27
Figura 14. Sistemas de calibración volumétricos	29
Figura 15. Sistema de calibración gravimétrico	30
Figura 16. Uso de rectificadores/acondicionadores de flujo	32
Figura 17. Patrones tipo medidor seco	39
Figura 18. Actualización tecnológica del patrón tipo medidor seco	40
Figura 19. Patrón secundario tipo cámara húmeda	41
Figura 20. Funcionamiento de un patrón secundario tipo cámara húmeda	42
Figura 21. Banco de calibración basado en cámaras húmedas.....	43
Figura 22. Toberas de flujo crítico	44
Figura 23. Banco de calibración de medidores residenciales con toberas de flujo crítico..	45
Figura 24. Banco de calibración de medidores industriales con toberas de flujo crítico	46
Figura 25. Calibración con patrón primario tipo campana gasométrica	47
Figura 26. Factores que influyen la medición	54
Figura 27. Errores máximos permisibles medidor G 1.6	55
Figura 28. Errores máximos permisibles medidor G 2.5	56
Figura 29. Errores máximos permisibles medidor G 4	56
Figura 30. Límites de incertidumbre del patrón de medición	57
Figura 31. Alcance de medición de los LFEs patrón seleccionados	62
Figura 32. Corte transversal de los LFEs patrón seleccionados.....	62
Figura 33. Detalle transversal de los LFEs patrón seleccionados	63
Figura 34. Detalle transversal de los LFEs patrón seleccionados	65
Figura 35. Desempeño del patrón seleccionado versus requisitos normativos	66
Figura 36. Consola de medición.....	67
Figura 37. Esquema propuesto para el sistema de calibración.....	72

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR (LFEs) A LA VERIFICACIÓN METROLÓGICA DE MEDIDORES DE GAS RESIDENCIAL*

AUTOR: JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR

Palabras Clave: metrología, calibración, medidores de gas, flujo laminar, patrón, ISO/IEC 17025, verificación metrológica, distribución, gas natural.

DESCRIPCIÓN:

La ley establece que los medidores de gas residenciales deben ser calibrados con una periodicidad de máximo cinco (5) años, siendo esta actividad una responsabilidad de la empresa distribuidora. Teniendo en cuenta el considerable número de usuarios de gas natural en Colombia, la insuficiencia de laboratorios de calibración acreditados y el crecimiento que experimenta el sector, es necesario contar con sistemas de calibración confiables y atractivos desde el punto de vista económico.

Se analizaron ampliamente los aspectos técnicos y económicos de la aplicación de Elementos de Flujo Laminar (Laminar Flow Elements – LFEs) como patrones para la verificación metrológica de medidores de gas residencial. Entre las ventajas que ofrecen estos equipos están la capacidad para conservar su desempeño por extensos períodos de tiempo y la ausencia de partes móviles, por otra parte, desde el punto de vista económico, el costo de implementación de un laboratorio basado en esta tecnología es intermedio entre las cámaras húmedas y las toberas de flujo crítico, correspondiendo estas tecnologías a los patrones con mayor popularidad en la actualidad.

El resultado principal del estudio fue confirmar la viabilidad de usar los LFEs como patrones de medición; adicionalmente se propone el diseño de un nuevo sistema (híbrido), compuesto por un LFE para bajos caudales y una tobera de flujo crítico para los caudales mayores, operando ambos a presión.

* Monografía para optar al Título de “Especialista en Ingeniería del Gas”

SUMMARY

TITLE: ECONOMIC AND TECHNICAL STUDY OF LAMINAR FLOW ELEMENTS APPLICATION TO METROLOGICAL VERIFICATION OF RESIDENTIAL GAS METERS*

AUTHOR: JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR

Keywords: metrology, calibration, gas meters, laminar flow, standard, ISO/IEC 17025, metrological verification, distribution, natural gas.

DESCRIPTION:

The law establishes that residential gas meters must be calibrated within the time allotted as five years maximum, being this activity a responsibility of the distributing company. From an economic point of view and considering the great number of natural gas users in Colombia, the lack of accredited calibration laboratories and the growth that this sector is experiencing, is necessary to count on reliable and attractive calibration systems.

The technical and economic aspects of the application of laminar flow elements as standards for metrological verification of residential gas meters were analyzed widely. Some of the advantages that these equipment offer are the capacity to maintain their performance for a long period and the absence of mobile parts, on the other hand, from the economic point of view, the cost of setting up a laboratory based on this technology is intermediate between wet test meters and the critical flow nozzles, corresponding these technologies to the standards with greater popularity at the present time.

The main result of this study was to confirm the viability to use laminar flow elements like measurement standards. Additionally it is proposed a new system design (hybrid), made up with one laminar flow element for low flow rates and one critical flow nozzle for the greater flow rates, operating both with pressure.

* Monograph to apply for the academic qualification of "Gas Engineering Expert"

INTRODUCCIÓN

La parte de la metrología que se relaciona con las transacciones comerciales se denomina “*Metrología Legal*” y busca garantizar, a todo nivel, que el cliente que compra algo reciba la cantidad efectivamente pactada. Según la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es la totalidad de los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos establecidos por, o por referencia a, autoridades públicas y puestas en vigor por su cuenta con la finalidad de especificar y asegurar, de forma regulatoria o contractual, la calidad y credibilidad apropiadas de las mediciones relacionadas con los controles oficiales, el comercio, la salud, la seguridad y el ambiente.

En el comercio de gas natural residencial, el usuario paga mensualmente una cantidad de dinero asociada al consumo de dicho energético, para este propósito se instala un medidor de gas a la entrada de las viviendas. De acuerdo con la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), en la Resolución CREG 067 de 1995 (*Código de Distribución de Gas Combustible por Redes*), estos equipos deben estar sujetos a verificación y control metrológico como máximo cada cinco años, cumpliendo con las disposiciones que establece la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) para tal efecto.

De acuerdo con las estadísticas del Ministerio de Minas y Energía, en Colombia a diciembre 31 del año 2005 existían 3'821.905 usuarios residenciales de gas natural, de los cuales el 85% representaba los estratos 1, 2 y 3 (*donde existe un mayor desconocimiento de las herramientas legales y técnicas*). Haciendo una retrospectiva, entre el período 1999 a 2000 se conectaron 284.020 nuevas instalaciones residenciales, lo cual indica que las mismas, según lo especificado en la Ley, deben ser verificadas metrológicamente durante el 2006. Considerando que actualmente en Colombia tan solo existen cinco laboratorios de calibración acreditados por la SIC, resulta evidente que la infraestructura disponible es insuficiente para cumplir las exigencias de control y protección al consumidor. Dividiendo el total de medidores entre los laboratorios disponibles, sería necesario que cada laboratorio calibrara un total de 56.804 medidores en el transcurso del año (*¡equivalente a calibrar 156 medidores diarios durante los 365 días del año!*).

A pesar de que la normativa técnica colombiana permite la aplicación de métodos de muestreo estadístico para la verificación posterior de medidores, hasta el momento solo se conoce el resultado de la aplicación de dichos estudios en la Costa Atlántica, particularmente en la ciudad de Cartagena, donde la empresa distribuidora de dicha ciudad (*Surtigas S.A. E.S.P.*) realizó un muestreo de los medidores instalados con antigüedad superior a 5 años para analizarlos en su laboratorio de calibración. Los resultados obtenidos, presentados en el 2004, fueron bastante interesantes y mostraron una fuerte dependencia entre la calidad del medidor (*desempeño metrológico*) y su fabricante.

De acuerdo con lo expuesto, es imprescindible que las comercializadoras y distribuidoras de gas cuenten con la infraestructura necesaria para asegurar la confiabilidad, transparencia

y exactitud de las mediciones de gas en nuestro país. Una de las barreras asociadas al establecimiento de laboratorios de calibración es la inversión que debe realizarse para su montaje, puesta en marcha y sostenimiento, considerando que los laboratorios deben cumplir con los requisitos de la norma NTC-ISO/IEC 17025¹ para obtener su acreditación ante la SIC, adquiriendo de esta forma validez en sus resultados.

Los requisitos que debe cumplir una instalación de calibración de medidores de gas están en las normas técnicas correspondientes, sin embargo, un laboratorio acreditado para tal propósito no solamente debe demostrar que cumple con los requisitos técnicos, sino que también debe acreditar su aptitud en cuanto a la organización, el personal, la trazabilidad y el aseguramiento de la calidad de los resultados, entre otros aspectos relevantes.

En la medida en que avanza la ciencia y la tecnología, se desarrollan nuevos instrumentos y equipos de medición que permiten la obtención de resultados con menor incertidumbre y con ventajas significativas sobre sus predecesores. El presente trabajo se enfoca en primera instancia hacia el estudio de los Elementos de Flujo Laminar (*en inglés: Laminar Flow Elements*²) y también hacia la evaluación técnica de la viabilidad de su aplicación a la calibración de medidores de gas residenciales, incluyendo un sencillo análisis económico que describe el grado de conveniencia en el uso de dichos instrumentos con respecto a las tecnologías convencionales.

Esta tecnología, basada en uno de los principios básicos de la mecánica de los fluidos, ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años, llegando a ser usada como patrón de transferencia en la ejecución de comparaciones entre laboratorios para medir bajos caudales de gas.

Se espera que la información recopilada y los resultados obtenidos, basados en el estado del Arte de la medición de fluidos gaseosos por medio de LFEs sirvan de respaldo a futuros estudios que valiéndose de la experimentación permitan confirmar las conclusiones de la presente monografía y contribuyan a la consolidación de un mayor número de laboratorios de calibración de alta calidad técnica y enfocados a atender la necesidad de equidad y transparencia en las mediciones de gas natural a nivel doméstico e inclusive la de exactitud en el sector industrial, científico y académico.

¹ “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”. ICONTEC. 2001.

² En adelante se referirá a los Elementos de Flujo Laminar como “LFEs” en plural o “LFE” en singular.

CAPÍTULO I

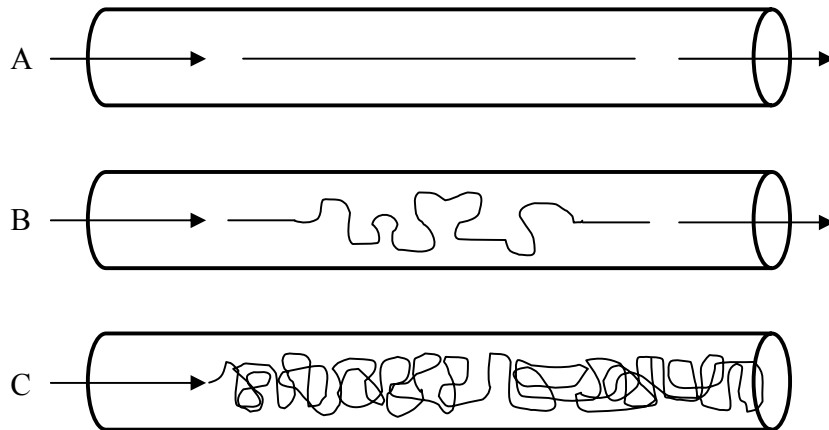
1. FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS

1.1. REGIMENES DE FLUJO

A finales del siglo XIX, el científico irlandés Osborne Reynolds, llevó a cabo un grupo de experimentos clásicos que permitieron caracterizar la forma en que se desarrollaba el flujo en conductos cerrados. Reynolds inyectaba tintas en una corriente de flujo y observaba la forma en que la tinta se movía a través del fluido.

A bajas velocidades (y altas viscosidades) Reynolds observó que la tinta describía una línea recta desde el punto de inyección; él llamó esta condición “*flujo recto*” (Figura 1-A). Actualmente a esta condición la llamamos “*flujo laminar*” debido a que el fluido se mueve como si estuviera compuesto por láminas que deslizan una sobre la otra. Una vez que se incrementa la velocidad, se alcanza una condición en la que la tinta se desplaza en línea recta, al igual que en el caso del flujo laminar, pero después de haber recorrido una porción del trayecto, su desplazamiento se convierte en un recorrido caótico, indicando una inestabilidad (Figura 1-B). En la medida en que Reynolds aumentó la velocidad en la tubería, observó que la tinta se dispersaba en forma instantánea dentro de la corriente del flujo; él llamó a este fenómeno “*flujo sinuoso*” (Figura 1-C). Actualmente a esta característica del flujo se le llama “*flujo turbulento*”.

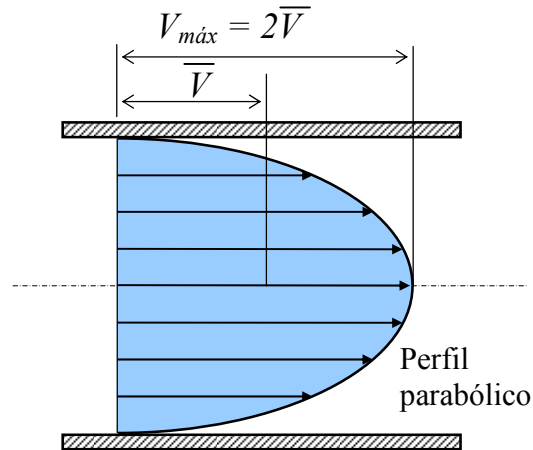
Figura 1. Experimentos de Reynolds



El trabajo de Reynolds mostró que en un flujo laminar las fuerzas viscosas (*caracterizadas por la fricción interna del fluido*) dominan el comportamiento del fluido; un análisis de las velocidades locales a través de la tubería muestra que el perfil de velocidades del flujo es de

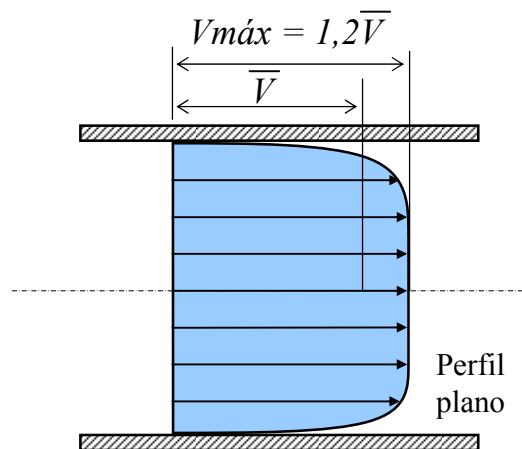
forma parabólica, siendo la velocidad en el centro de la tubería el doble de la velocidad media del fluido (*Ver Figura 2*).

Figura 2. Perfil de velocidades de un flujo laminar



En el régimen turbulento las fuerzas inerciales (*fuerzas dinámicas*) dominan el comportamiento del fluido, evidenciado por fuerzas laterales y transversales que ocasionan la dispersión inmediata de la tinta en la corriente del flujo. Estas fuerzas laterales ocasionan una mezcla completa de la tinta en el fluido y muestran un perfil de velocidades con relativamente pequeños cambios en la velocidad local a través del área de la tubería, una vez que se ha alejado una cierta distancia de la pared de la tubería (*Figura 3*). La distancia desde la pared de la tubería (*espesor de la capa límite*) es una función de las propiedades del fluido y de la condición de la superficie interna de la tubería (*rugosidad*). El perfil de velocidades es aplanado (*Figura 3*), pero no completamente como se idealiza en algunos textos. El grado de planitud cambia de acuerdo con la velocidad del fluido y su viscosidad.

Figura 3. Perfil de velocidades de un flujo turbulento



En conclusión, existen dos regímenes bien definidos: flujo laminar y flujo turbulento, con una zona de inestabilidad en medio que se denomina zona de transición. En esta zona, el flujo puede comportarse como un flujo laminar o como un flujo turbulento, saltando de una condición a la otra, dependiendo de las inestabilidades en la corriente del flujo.

Como resultado de sus trabajos, Reynolds desarrolló el famoso parámetro adimensional que lleva su apellido (Re) y caracteriza la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas asociadas al flujo de un fluido (*Ecuación 1*). El número de Reynolds define el régimen en que se desarrolla un flujo: laminar, turbulento o en transición.

Ecuación 1
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

donde:

Re	Número de Reynolds (<i>parámetro adimensional</i>)
ρ	Densidad del fluido
v	Velocidad media del fluido
D	Diámetro interno de la tubería
μ	Viscosidad absoluta del fluido

Para $Re > 4000$ el perfil de velocidades es aplanado y el flujo turbulento, cuando $Re < 2000$ el perfil es parabólico y el flujo laminar. En el intervalo $2000 < Re < 4000$ se define la zona de transición, en esta zona no opera (*ni debe operar*) ningún medidor, debido a que la repetibilidad se verá afectada drásticamente por el comportamiento aleatorio de las condiciones del flujo.

La mayoría de los medidores operan bajo régimen turbulento, en esencia la mayoría de las aplicaciones industriales y los flujos de fluidos ocurren bajo esta condición. Una excepción particular es la de los LFEs que se estudiarán en el presente trabajo.

1.2. FLUJO VISCOZO A TRAVÉS DE CONDUCTOS

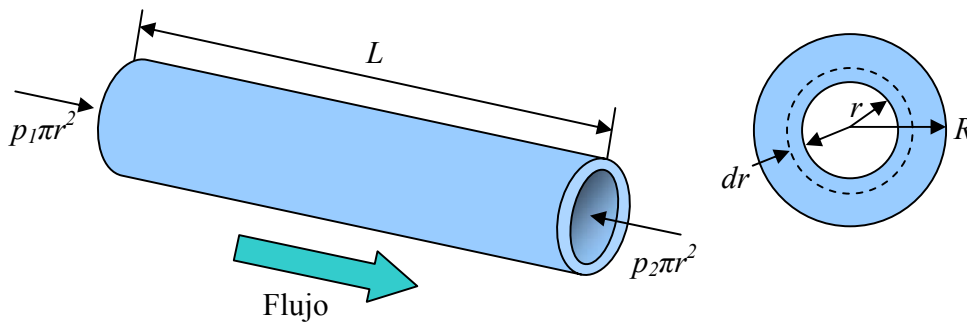
Los primeros experimentos documentados acerca del comportamiento de flujos de baja velocidad a través de conductos de sección circular fueron realizados en forma independiente en 1838 por el físico y médico francés Jean Louis Marie Poiseuille, quien estaba interesado en el estudio del flujo de sangre a través de venas y vasos capilares, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, quien adelantaba investigaciones idénticas en el campo de la hidráulica.

Los resultados de los experimentos de estos dos científicos, enfocados hacia el comportamiento del flujo laminar, incompresible y en estado estacionario, a través de conductos de sección circular constante sirvieron para establecer la Ley de Poiseuille-

Hagen. Esta ley se aprovecha para representar el flujo de sangre a través de capilares y venas, el flujo de aire en los alvéolos del pulmón, el flujo a través de una aguja hipodérmica e incluso el de un líquido a través de un pitillo o caña de beber.

Consideremos un fluido viscoso que se desplaza en régimen laminar a través de una tubería circular de radio interior R , y longitud L , bajo la acción de la fuerza generada por la diferencia de presión existente en los extremos del tubo (*Figura 4*).

Figura 4. Flujo laminar a través de una sección de tubería circular



La fuerza F puede expresarse de acuerdo con la Ecuación 2:

Ecuación 2 $F = (p_1 - p_2)\pi r^2$

En la Ecuación 3 se presenta la Ley de Newton de la viscosidad para el flujo a través del tubo circular, esta ley considera que la fuerza aplicada por unidad de área para generar el flujo es proporcional al gradiente de velocidad, siendo la viscosidad μ la constante de proporcionalidad.

Ecuación 3 $\frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dr}$

Sustituyendo la Ecuación 2 en la expresión de la ley de Newton para la viscosidad (*Ecuación 3*), asumiendo que el fluido es newtoniano, y teniendo en cuenta que el área está representada por la superficie lateral de un cilindro de longitud L y radio r , se obtiene:

Ecuación 4 $\frac{(p_1 - p_2)\pi r^2}{2\pi r L} = -\mu \frac{dv}{dr}$

La justificación del signo negativo es que la velocidad v disminuye al aumentar el área de flujo A , directamente relacionada con el radio del tubo r .

Integrando la Ecuación 4, se obtiene el perfil de velocidades en función de la distancia radial, al eje del tubo. Debe tenerse en cuenta que de acuerdo con el principio de adherencia, la velocidad en las paredes del tubo $r=R$ es nula ($v=0$).

$$-\int_v^0 dv = \frac{p_1 - p_2}{2\mu L} \int_r^R r dr$$

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} (R^2 - r^2)$$

Ecuación 5

La expresión dada en la Ecuación 5 representa una parábola, por lo tanto, el flujo tiene un perfil de velocidades parabólico, siendo la velocidad máxima en el centro del tubo.

Representando como Q_v el caudal volumétrico (*volumen que atraviesa cualquier sección normal del tubo en la unidad de tiempo*), de acuerdo con el modelo presentado en la Figura 4, puede afirmarse que el volumen de fluido que atraviesa el área anular comprendida entre r y $r+dr$ en la unidad de tiempo es $v(2\pi r dr)$, donde v es la velocidad del fluido a una distancia r del eje del tubo y $2\pi r dr$ es el área del anillo. Para obtener el caudal volumétrico es necesario realizar una integración:

$$Q_v = \int_0^R v 2\pi r dr = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{2\mu L} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{\pi}{8} \frac{(p_1 - p_2) R^4}{\mu L}$$

$$Q_v = \frac{\pi}{8} \frac{(p_1 - p_2) R^4}{\mu L}$$

Ecuación 6

La Ecuación 6 se conoce como la Ley de Poiseuille-Hagen y afirma que el caudal volumétrico Q_v es inversamente proporcional a la viscosidad μ , directamente proporcional a la cuarta potencia del radio del tubo R , y directamente proporcional al gradiente de presión a lo largo del tubo, es decir al cociente $(p_1 - p_2)/L$.

Como se verá posteriormente, la Ley de Poiseuille-Hagen es el principio de operación de los LFEs con indicación volumétrica; en términos generales puede afirmarse que esta ley cuantifica la relación entre la caída de presión que experimenta un flujo viscoso y el correspondiente caudal a través del área de flujo.

1.3. ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR (LFEs)

Los elementos de flujo laminar, también conocidos como “LFEs” por el acrónimo de “*Laminar Flow Elements*”, o simplemente como elementos laminares o medidores laminares, son usados para medir el caudal de gases a través de tuberías (*Figura 5*).

Figura 5. Elementos de Flujo Laminar (*LFEs*)



Cortesía: Teledyne Technologies Incorporated

Estos medidores operan mediante la generación de una diferencia de presiones, la cual es proporcional a la velocidad del gas que pasa a través de una sección de área transversal constante y con una longitud definida. Puesto que la caída de presión a través de dicha sección es función de la velocidad media del gas en su interior, es posible obtener una relación entre la caída de presión y el caudal volumétrico a las condiciones del flujo (*producto entre la velocidad media y el área de la sección*).

A través de los años se han producido diferentes diseños y estilos de LFEs, así mismo, se ha incrementado notablemente el número de fabricantes. Actualmente es posible encontrar comercialmente LFEs para medir caudal de gases desde $0,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ hasta $3800 \text{ m}^3/\text{h}$ (*Full Scale - FS*)³. Los LFEs son usados principalmente como medidores en procesos de producción y como patrones en laboratorios de calibración de medidores de caudal/volumen de gas.

A pesar de que los LFEs pertenecen a la categoría de los medidores de caudal por presión diferencial, los LFEs son un caso particular (*diferente de elementos primarios tales como placas de orificio, toberas, Venturis, etc.*), fundamentalmente por dos aspectos:

- La presión diferencial que producen es proporcional al caudal volumétrico (*a diferencia del cuadrado del caudal*). La característica que poseen todos los LFEs, de poseer una relación siempre lineal entre el caudal y la diferencia de presión generada es una de sus principales ventajas.
- La forma en que se determina la relación entre la presión diferencial y el caudal no está normalizada, así mismo, tampoco existen correlaciones fundamentadas en bases de datos experimentales⁴ acerca del desempeño de los LFEs. Por lo tanto se requiere calibrar cada LFE individualmente. Siendo ésta una de sus desventajas.

³ Cuando se referencia una medida volumétrica (volumen o caudal) de gas se asumirá que está referenciada a unas condiciones de temperatura y presión de 288,15 K y 101 325 Pa respectivamente, a menos que se indique una situación diferente.

⁴ Para citar un ejemplo: En medición por placa de orificio se cuenta con ISO 5167 y con el Reporte AGA No. 3, a través de los cuales puede determinarse el coeficiente de descarga, basándose en la correlación obtenida por Reader-Harris/Gallagher (RG), la cual se fundamenta en una extensa base de datos experimental.

Las relaciones máximo/mínimo que se ofrecen a nivel comercial varían de acuerdo con los fabricantes y los modelos, principalmente entre 1:10 y 1:100; dependiendo de la calidad del servicio de calibración y del diseño del medidor, la incertidumbre asociada a la medición puede estar entre $\pm 0,25$ y $\pm 0,50\%$ de la lectura, con una fuerte dependencia de la calidad del transductor de presión diferencial asociado al LFE.

La mecánica de fluidos asociada a la operación de un LFE (*una vez que ha sido calibrado*), es un campo de la ciencia que ha sido analizado y comprendido en gran medida. Siempre y cuando los resultados de la calibración sean confiables, el usuario puede usarlos para predecir el comportamiento del medidor para condiciones de operación diferentes (*inclusive con gases diferentes*), con una exactitud relativamente alta. Actualmente, los LFEs incorporan sistemas basados en microprocesadores, conteniendo los sensores y algoritmos necesarios para sacar el máximo provecho a la capacidad de los LFEs.

Los LFEs han sido usados exitosamente en muchas aplicaciones industriales, entre las que se destacan:

- Aeroespacial
- Aeronáutica
- Alimentos
- Automotriz
- Farmacéutica
- Militar
- Petroquímica
- Química

Así mismo, han sido aplicados con resultados óptimos en la realización de investigaciones médicas, relacionadas con la respiración humana. En general podría decirse que los LFEs son usados en aplicaciones donde se requiera medir pequeños caudales de gases, con bajas caídas de presión, poca incertidumbre en la medición y buena exactitud. Un aspecto esencial de su aplicabilidad es la necesidad de operar con gases extremadamente limpios, secos y no corrosivos.

La aplicación de los LFEs a procesos automatizados es muy común en la actualidad, debido a que su repetibilidad ha mejorado sustancialmente en los últimos años. Frecuentemente se asocian con actividades de control, donde actúan como dispositivo de retroalimentación.

Un área de fundamental interés es aquella asociada a su uso en Laboratorios de Calibración y Ensayos, donde los LFEs se usan como medidores de gran exactitud para la realización de ensayos orientados hacia la verificación de la conformidad de elementos que operan con gases (*P. Ej. reguladores, válvulas, gasodomésticos, etc.*), teniendo en cuenta los requisitos técnicos estipulados acerca a su calidad. Dada su calidad metrológica, también son usados como patrones secundarios para calibrar medidores de menor exactitud.

Los LFEs no sólo han sido usados como patrones secundarios y/o de referencia, también han sido utilizados como patrones de transferencia para la realización de comparaciones entre laboratorios, con el objetivo de determinar su aptitud (*proficiency*).

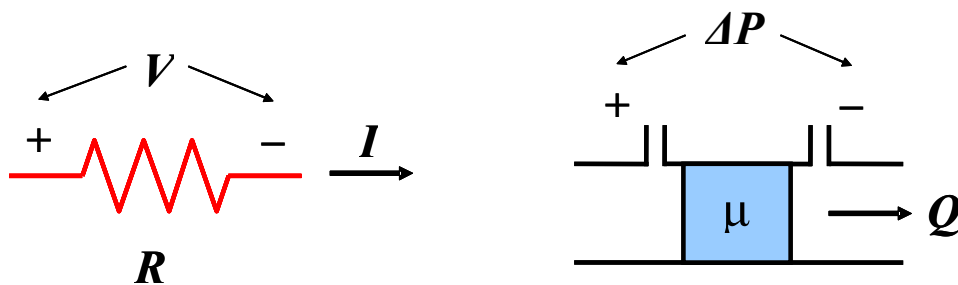
Un estudio realizado por NIST (*National Institute of Standards and Technology – EUA*), demostró la aptitud de los LFEs como patrones de transferencia para bajos caudales (*especialmente inferiores a 60 dm³/h*), comparando su desempeño con el de las boquillas sónicas (*sonic nozzles*), bajo condiciones de operación similares, siendo sometidos a diferentes pruebas de sensibilidad, principalmente con relación a la temperatura, la composición del gas y la estabilidad en la calibración con respecto al tiempo [1].

1.4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

Para comprender mejor el principio de operación de los LFEs, es de gran utilidad hacer la analogía entre su funcionamiento y el de los circuitos eléctricos, a los cuales se asocia la ley de Ohm.

Usar un LFE para medir el caudal de gas en una tubería es similar a la acción de medir la caída de potencial a través de una resistencia eléctrica con el fin de determinar la corriente en un circuito eléctrico (*Figura 6*).

Figura 6. Analogía de los LFEs con la ley de Ohm



Por definición, la constante de proporcionalidad en la ley de Ohm es la unidad (1). La corriente I en amperios, es igual a la caída de potencial V a través de una resistencia eléctrica R en ohm. Por otra parte, el caudal volumétrico a condiciones de flujo Q , que pasa a través de un LFE, puede representarse por la constante de proporcionalidad C , multiplicada por la presión diferencial ΔP , dividiéndose éste producto por la viscosidad del gas μ .

El valor de C debe determinarse experimentalmente, durante la calibración del LFE. Es importante mencionar que, al momento de expresar su magnitud, se acostumbra usar el símbolo de “aproximadamente igual” (\approx) puesto que, estrictamente hablando, C no es

constante para la mayoría de los LFEs, pero varía de forma predecible en el intervalo de caudales para el cual está diseñado el medidor.

La analogía con la ley de Ohm ilustra la importancia de la viscosidad del gas y la razón por la cual los LFEs se denominan medidores de “*resistencia lineal*”. La viscosidad del gas adquiere el significado de la resistencia eléctrica en la analogía objeto de estudio. Sin embargo, a diferencia de las resistencias eléctricas, cuyo valor puede medirse en forma directa, la determinación de la viscosidad de un gas constituye un reto mayor [2].

En la práctica, la viscosidad de los gases se calcula a través de variables como la presión y la temperatura, usando bases de datos o correlaciones empíricas. Posiblemente no hay un medidor más dependiente de un valor exacto de la viscosidad que el LFE. A pesar de que la magnitud de la viscosidad se requiere para obtener el número de Reynolds y calcular el coeficiente de descarga de una placa de orificio o una tobera, la sensibilidad de estas tecnologías con respecto a la viscosidad es muy baja, principalmente porque su aplicación es fundamentalmente a la medición de caudales en régimen turbulento.

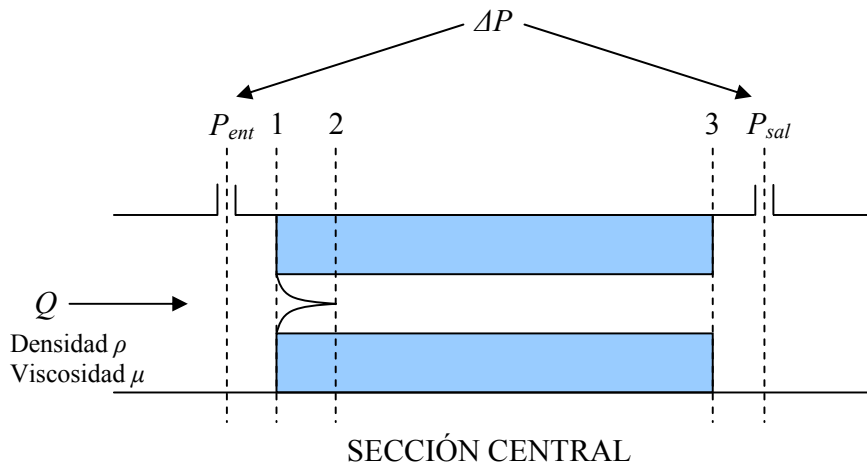
Un error relativamente elevado en la viscosidad (*y como consecuencia en el número de Reynolds*), asociada al gas objeto de medición en los medidores convencionales de caudal a través de presión diferencial, representará un error relativamente bajo. Por otra parte, el caudal volumétrico a través de un LFE es inversamente proporcional a la viscosidad del gas. De esta forma, cualquier error en la estimación en la viscosidad del gas ocasionará errores de igual magnitud pero de signo contrario en la medición de caudal.

La analogía con la ley de Ohm sirve como una aproximación inicial para conocer el principio de operación y el desempeño de los LFEs reales. Debe tenerse en cuenta que la densidad del fluido ρ , no aparece en el modelo, a diferencia de los demás medidores de caudal por presión diferencial, donde la densidad juega un papel fundamental. Bajo condiciones de flujo laminar, completamente desarrollado en una tubería, donde la capa límite en torno a las paredes de la tubería ha crecido de forma tal que atraviesa por completo la sección transversal de la tubería, la caída de presión para una longitud de tubería dada, es independiente de la densidad del fluido.

Adicionalmente, esta caída de presión varía linealmente con respecto al producto entre el caudal volumétrico y la viscosidad del gas. La razón por la cual la analogía con el modelo de la ley de Ohm es una aproximación al funcionamiento de los LFEs, de por qué varía la “*constante*” C en la ecuación, es que la caída total de presión ΔP , medida entre la entrada y la salida del LFE, no es dependiente en forma exclusiva de la viscosidad.

En la Figura 7, se representa un diagrama esquemático típico del funcionamiento de un LFE. Debido a consideraciones de los fabricantes, las tomas de presión diferencial de la mayoría de los LFEs se localizan sobre cualquier lado de su “*sección central*”. La sección central varía según el diseño del medidor, dependiendo del fabricante y del alcance de medición del LFE, de tal forma que el diseño cubra el caudal máximo al cual debe operar el medidor (*a la máxima caída de presión*).

Figura 7. Diagrama esquemático del funcionamiento de un LFE



El área transversal total, efectiva para el flujo de gas, se reduce abruptamente a la entrada y la salida de la mayoría de los LFEs. La caída de presión a la entrada (entre P_{ent} y la sección 1 de la Figura 7), y a la salida (entre la sección 3 y P_{sal}), de la sección central, son proporcionales al producto de la densidad por la velocidad del fluido al cuadrado [3]. De la misma forma, la pérdida de presión asociada con el desarrollo de la capa límite laminar a la entrada de la sección central (secciones 1 a 2), sigue una dependencia idéntica, siendo nuevamente proporcional al producto de la densidad por la velocidad del fluido al cuadrado [4].

Solamente entre la sección 2 y la sección 3, la pérdida de presión es exclusivamente dependiente de los efectos viscosos, de acuerdo con la analogía de la ley de Ohm. Ésta pérdida de presión es proporcional al producto de la viscosidad y el caudal volumétrico a condiciones del flujo, y representa la mayor parte de la caída total de presión ΔP , medida a través de las tomas de presión de cualquier LFE.

Por lo anterior, resulta más conveniente desarrollar un modelo que tenga en cuenta la suma de los componentes de la diferencia de presión ΔP para los LFE. Puesto que el objetivo es obtener un modelo práctico que pueda usarse para predecir el desempeño de los LFEs, deben hacerse varias suposiciones. Para comenzar, los LFEs operan con gases desplazándose a velocidades en la región inferior del régimen subsónico. Adicionalmente, debido a que la caída total de presión a través del LFE es muy baja, en comparación con la presión estática del gas, es posible considerar el flujo como incompresible.

Al asumir incompresible el flujo es viable asumir un valor medio para la densidad del gas ρ , de forma que pueda calcularse fácilmente la caída de presión asociada a la entrada y la salida del medidor, y también al desarrollo de la capa límite laminar. Puesto que el caudal volumétrico Q , a las condiciones del flujo, es directamente proporcional a la velocidad, los tres componentes de la presión diferencial que no se relacionan con la resistencia viscosa,

pueden expresarse en términos de ρQ^2 . La sumatoria total de los términos asociados con la caída de presión en la dirección del flujo, puede escribirse de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 7} \quad \Delta P = k_{\text{entrada}} \rho Q^2 + k_{\text{transición}} \rho Q^2 + C_{\text{laminar}} \mu Q + k_{\text{salida}} \rho Q^2$$

Aún bajo la condición de flujo incompresible, los cambios en la sección transversal entre las estaciones, ocasionarán variaciones localizadas en el valor de Q , al interior de un LFE. Bajo ninguna circunstancia es práctico determinar el valor de las constantes individuales k en la Ecuación 7, principalmente porque es virtualmente imposible conocer con exactitud el área transversal particular para todos los tipos, modelos y diseños de LFEs. Sin embargo, aún en los diseños más sofisticados, la relación de áreas entre una estación y otra, permanece constante. El uso de un valor “medio”, único para Q solamente ocasionará un cambio en el valor particular de k para cada estación. Por esta razón, la suma de los términos “ $k\rho Q^2$ ”, en la ecuación, debe permanecer constante.

Combinando éstos términos para obtener un modelo práctico, que permita visualizar la relación entre el caudal volumétrico, las propiedades del gas y la presión diferencial para los LFEs, se obtiene:

$$\text{Ecuación 8} \quad \Delta P = C_{\text{laminar}} \mu Q + K \rho Q^2$$

La Ecuación 8 es útil en el sentido de que resume los dos componentes principales que ocasionan la caída de presión a través de un LFE. Incluso puede obtenerse un mejor arreglo dividiendo ambos lados de la Ecuación 8 por μQ :

$$\text{Ecuación 9} \quad \frac{\Delta P}{\mu Q} = C_{\text{laminar}} + K \left(\frac{\rho Q}{\mu} \right)$$

Esta ecuación, desarrollada por Steele y Orbach en 1963 [5] es importante por dos razones:

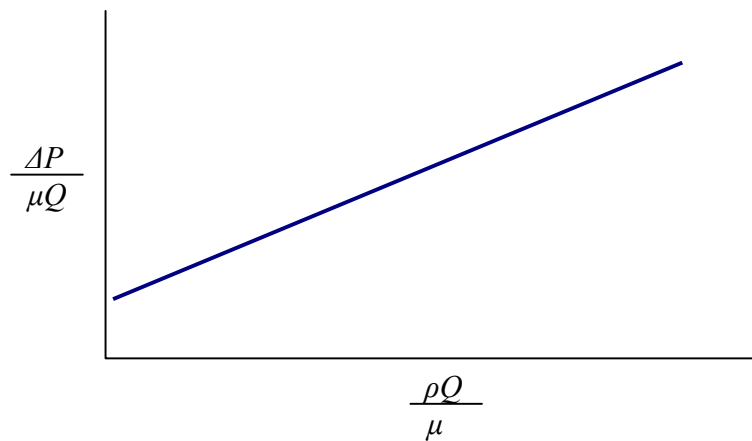
- Muestra que la desviación del desempeño del LFE, con respecto al modelo de la ley de Ohm, depende de la cantidad $\rho Q/\mu$.
- El término $\rho Q/\mu$ es directamente proporcional al número de Reynolds.

De acuerdo con lo anterior, y de gran relevancia desde el punto de vista de la mecánica de los fluidos, es que el término $\rho Q/\mu$ sirve para analizar el desempeño de los LFEs, usando un método basado en principios físicos establecidos.

1.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS

Si se asume el desempeño ideal de un LFE y graficáramos la Ecuación 9 para el alcance de medición del elemento, obtendríamos la forma de una línea recta, donde los valores de K y $C_{laminar}$ representan respectivamente la pendiente y su intercepto (Figura 8).

Figura 8. Desempeño ideal de un LFE



Sin embargo, la situación real, representada por los resultados obtenidos de una calibración, muestra que la relación entre $\Delta P/\mu Q$ y $\rho Q/\mu$ se desvía de una línea recta, ajustándose más al comportamiento de un polinomio de segundo o tercer orden, es decir, cuadrático o cúbico respectivamente. La forma de la curva que relaciona $\Delta P/\mu Q$ con el parámetro pseudo-Reynolds $\rho Q/\mu$ para un LFE es característica del medidor y generalmente es completamente reproducible entre las calibraciones que se realicen del mismo.

Los parámetros de la Ecuación 9 son importantes desde el punto de vista académico, pero no son completamente adecuados para expresar los resultados de la calibración de un LFE, desde el punto de vista práctico. Después de todo, el usuario desea medir el caudal a partir de la generación de una presión diferencial en un dispositivo, en conjunto con otras variables (*temperatura y presión absoluta del gas*), de forma que pueda calcularse la densidad y la viscosidad del gas. El hecho es que la variable caudal Q , presumiblemente desconocida, que aparece a ambos lados de la Ecuación 9, implica la necesidad de implementar algún tipo de procedimiento o algoritmo iterativo. Una aproximación a través de un método de prueba y error puede evitarse en la medida en que los resultados de la calibración se expresen usando una variable independiente que no contenga a Q . De esta forma, se han desarrollado varias maneras de expresar los resultados de una calibración, acogiendo esta idea.

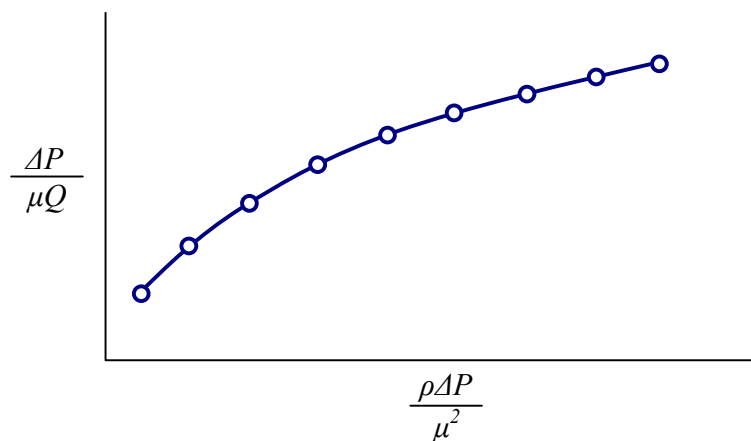
La primera de ellas es empírica y muy similar al concepto empleado al realizar la calibración de medidores convencionales de caudal por presión diferencial, tales como

placas de orificio, Venturis y toberas. Tradicionalmente, el desempeño de estos dispositivos se expresa en términos del coeficiente de descarga versus número de Reynolds. El coeficiente de descarga es un parámetro adimensional, que representa la relación entre el caudal real, obtenido experimentalmente, y el caudal ideal, obtenido a través de la teoría de la mecánica de los fluidos y la geometría del medidor.

A pesar de esto, el problema aún persiste, sin embargo, lo que se ha hecho para solucionar el inconveniente es expresar el coeficiente de descarga como una función del cociente entre el número de Reynolds y el coeficiente de descarga. Esta técnica elimina el caudal de la variable independiente, manteniendo el carácter adimensional de los datos presentados. Para la operación en régimen turbulento, las gráficas del coeficiente de descarga contra el número de Reynolds o contra el cociente anteriormente mencionado lucen muy similares, puesto que la variación en el coeficiente de descarga es bastante pequeña.

Los LFEs operan sobre un principio muy diferente al de los medidores antes discutidos. Para la mayoría de los LFEs puede afirmarse que el ΔP generado por el LFE es casi proporcional al producto μQ . Con respecto a la Figura 8, el cambio en el parámetro $\Delta P/\mu Q$, a lo largo del alcance de medición del LFE, usualmente es bastante bajo (*poco más de 1%*). Los LFEs bien diseñados, especialmente los que operan a caudales muy bajos, $\Delta P/\mu Q$ puede llegar a variar un poco más de 0,1%. Puesto que ΔP es considerablemente proporcional a μQ , puede afirmarse que Q es proporcional a $\Delta P/\mu$. Si se reemplaza Q en la expresión $\rho Q/\mu$ por el cociente $\Delta P/\mu$, se obtiene un nuevo parámetro: $\rho \Delta P/\mu^2$. Una gráfica de $\Delta P/\mu Q$ contra $\rho \Delta P/\mu^2$ para cualquier LFE se asemejará a la Figura 8, pero exhibirá un significativo grado de curvatura. La relación teórica entre estas variables se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Desempeño real de un LFE



La utilidad de esta gráfica es evidente, dado que ofrece al usuario los medios para determinar directamente el caudal, a partir del cálculo de ρ , μ y ΔP . Los resultados de las

calibraciones de LFEs en el NIST se presentan a través de tablas y gráficas de $\Delta P/\mu Q$ contra $\rho\Delta P/\mu^2$.

Otro punto de vista útil para analizar las características de los LFEs se basa en la aplicación del Teorema Pi de Buckingham, una técnica donde se combinan una serie de variables dentro de pequeños grupos adimensionales. Baker y Shafer identificaron siete variables que consideraron importantes [6]. En conjunto con Q , ΔP , μ y ρ , se incluyó una longitud característica D . Debido a que (*en teoría*) los efectos de la compresibilidad del gas podrían tener alguna influencia, también se incluyeron como parámetros la relación de calores específicos k y la presión estática absoluta P .

De acuerdo con el Teorema Pi, el número de grupos adimensionales será igual al número inicial de variables menos el número de unidades base requeridas para expresar las variables. Para este caso particular, se requieren tres unidades base: masa, longitud y tiempo; para poder expresar las siete variables. Por consiguiente, se desarrollaron en total cuatro parámetros adimensionales, teniendo la siguiente interrelación:

$$\frac{Q\mu}{\Delta P D^3} = f\left(\frac{\rho\Delta P D^2}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{P}, k\right)$$

Ecuación 10

Puesto que la relación de calores específicos es de naturaleza adimensional, y considerando que está asociada con los efectos de la compresibilidad, Baker y Shafer modificaron la expresión dada en la Ecuación 10 de la siguiente forma:

$$\frac{Q\mu}{\Delta P D^3} = \varphi\left(\frac{\rho\Delta P D^2}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{kP}\right)$$

Ecuación 11

Donde φ denota una función diferente de f . Curiosamente, el término $\Delta P/kP$ había sido identificado tiempo atrás, conociéndose como “*relación acústica*” [7].

El Teorema Pi sirve para identificar conjuntos de variables potencialmente valiosos, sin embargo, no es útil para revelar la naturaleza de las relaciones funcionales generadas, esto se obtiene a través de la experimentación. Cualquier formulación de φ que se produzca a partir de la calibración de un LFE será única y exclusiva para dicho medidor. La extrapolación hacia otros medidores, empleando la longitud característica D , no aplica para los LFEs, a diferencia de dispositivos más sencillos como las placas de orificio, los Venturis o las toberas que se diseñan con una geometría determinada. Teniendo en cuenta esta aseveración, la variable D (*la cual debería ser constante para un LFE en particular*), fue removida de la Ecuación 11, según las investigaciones llevadas a cabo por ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), quedando finalmente así:

$$\text{Ecuación 12} \quad \frac{Q\mu}{\Delta P} = \phi\left(\frac{\rho\Delta P}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{kP}\right)$$

Puede observarse que se obtiene de nuevo la expresión $\rho\Delta P/\mu^2$, discutida anteriormente (*gráficas de $\Delta P/\mu Q$ contra $\rho\Delta P/\mu^2$*), y que en forma adicional, $Q\mu/\Delta P$ es el recíproco del parámetro $\Delta P/\mu Q$, mostrado en la Ecuación 9. En conclusión, el acercamiento mediante análisis dimensional revela los mismos grupos fundamentales de variables que se presentaron en un inicio, con la adición de los posibles efectos que la compresibilidad del gas pueda tener sobre el desempeño de los LFEs.

Un estudio desarrollado por Todd [8], enfocado hacia la observación del comportamiento de un gran número de LFEs, de diferentes diseños y a varias condiciones de operación, usando múltiples gases y diferentes formas de presentación de los resultados de la calibración, suministró la evidencia para soportar la noción de que el modelo basado en el número de Reynolds es necesario y suficiente para predecir el desempeño del medidor. Todas las calibraciones desarrolladas durante este estudio se efectuaron a presión atmosférica usando LFEs estándar. Los valores de $\Delta P/P$ oscilaron entre 0,0024 y 0,0485. Se obtuvieron diferentes valores de la relación de calores específicos k usando helio, argón y dióxido de carbono, adicionalmente al aire y el nitrógeno. Se tomó mucho cuidado en que durante las pruebas, el parámetro del número de Reynolds $\rho Q/\mu$ no excediera el valor para el cual fueron diseñados los medidores, teniendo en cuenta los diferentes gases. Al final, no se tuvo una evidencia concluyente para sugerir que el término $\Delta P/kP$ fuera incluido en cualquiera de los modelos de desempeño examinados.

Se encontró que la expresión presentada en la Ecuación 13 brinda una descripción satisfactoria del desempeño de los LFEs típicos, operando con diferentes gases a condiciones de presión atmosférica.

$$\text{Ecuación 13} \quad \frac{Q\mu}{\Delta P} = \Psi\left(\frac{\rho\Delta P}{\mu^2}\right)$$

Usualmente, el uso de una ecuación cuadrática para la función Ψ es suficiente para relacionar $Q\mu/\Delta P$ y $\rho\Delta P/\mu^2$. Los resultados de la calibración de LFEs realizados en el U.S. Navy Primary Standards Laboratory normalmente se reportan usando un formato basado en estos parámetros. Este formato particular fue desarrollado para ser usado por personal que tiene conocimientos limitados en mecánica de fluidos y puede consultarse en [9].

De la misma forma, los resultados de la experimentación con dos LFEs, operando con un solo gas (*aire*) a presiones de 103 y 207 kPa [10] revelan que no existe evidencia de los efectos de la compresibilidad. Los datos para estos medidores fueron analizados satisfactoriamente usando un modelo basado en el número de Reynolds, el cual es en esencia el mismo que se representa en la Ecuación 9. Recientemente se han desarrollado nuevos diseños de LFEs, más especializados, y diseñados para operar a altas presiones

diferenciales [11 y 12]. Aparentemente estos nuevos medidores no exhiben una dependencia de la compresibilidad del gas en cuanto a su desempeño, por lo tanto se han caracterizado usando únicamente el modelo basado en las correlaciones para el número de Reynolds. Aún a altas presiones diferenciales, su desempeño es predecible, siempre y cuando su límite superior se localice dentro de la zona operacional de número de Reynolds. Sin embargo, de una forma imparcial, la misma restricción también aplica a los LFEs convencionales.

Otra forma de presentación de los datos de calibración que ha encontrado aceptación, particularmente entre los interesados en medir caudal másico, fue desarrollada en [8]. Este modelo está representado de la siguiente manera:

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

Ecuación 14

La función f en la Ecuación 14 es de carácter polinómico, con el término constante igual a cero (0). La omisión de la constante es una consecuencia de la condición inicial, a la cual Q es cero cuando ΔP es cero. El desempeño del medidor puede caracterizarse empleando la siguiente expresión empírica:

$$\frac{\rho Q}{\mu} = a_1\left(\frac{\rho \Delta P}{\mu^2}\right) + a_2\left(\frac{\rho \Delta P}{\mu^2}\right)^2 + a_3\left(\frac{\rho \Delta P}{\mu^2}\right)^3 + a_4\left(\frac{\rho \Delta P}{\mu^2}\right)^4$$

Ecuación 15

Los coeficientes a_i se determinan mediante un ajuste de mínimos cuadrados, basado en los resultados obtenidos en la calibración. En la mayoría de las calibraciones, solamente se requieren los primeros tres términos para ajustar los datos experimentales dentro de errores RMS inferiores a 0,01%. Para medidores pequeños pueden obtenerse ajustes con una precisión equivalente, empleando tan solo los dos primeros términos. De hecho, el desempeño del único LFE desarrollado en NIST [12] fue modelado con exactitud dentro de un intervalo de caudal 200:1 usando una ecuación que luego de un análisis pudo reducirse a los primeros dos términos de la Ecuación 15. Una ecuación que contiene solo tres términos apareció originalmente en [8]. Desde ese entonces, las mejoras en la instrumentación, junto con el perfeccionamiento de los procesos de calibración, ha mostrado que para algunos LFEs, se requiere un término de cuarto orden para ajustarse a sus características identificadas. Cualitativamente, los parámetros que aparecen en la Ecuación 14 y en la Ecuación 15 son en esencia números de Reynolds, siendo la variable independiente equivalente al término $\rho Q/\mu$ del número de Reynolds multiplicado por la cantidad $\Delta P/\mu Q$ de la Ecuación 9. Lo que hace atractivo este modelo a un segmento de la comunidad metrológica es que el caudal másico (ρQ) aparece en la variable dependiente.

Es oportuno mencionar que el análisis de los datos de calibración de los LFEs no está limitado a los métodos descritos hasta el momento. Quizás la forma más común de presentar los datos, por lo menos para los medidores calibrados por fabricantes, es una tabla

o curva de caudal volumétrico contra presión diferencial. Normalmente, este tipo de datos buscan suministrar al usuario una descripción del desempeño del medidor con un gas específico a una presión y temperatura establecidas. Los fabricantes usualmente incluyen información adicional a través de fórmulas de corrección o tablas para compensar los cambios en las condiciones de operación. El problema es que normalmente estas correcciones se basan en la suposición de que la característica fundamental del flujo laminar $\Delta P/\mu Q$ (o su recíproco $Q\mu/\Delta P$) es estrictamente una función de la presión diferencial medida. Esto es equivalente a decir que, a un valor particular de presión diferencial, el producto del caudal volumétrico a las condiciones del flujo por la viscosidad es constante. Esta suposición sería el caso de un LFE perfecto (*equivalente a que la constante K de la Ecuación 9 sea cero*). Sin embargo, en la realidad, la mayoría de los LFEs se desvían del comportamiento ideal. Los datos de calibración suministrados exclusivamente en términos de Q versus ΔP brindarán una corta descripción del desempeño del medidor, en comparación con cualquiera de las formulaciones basadas en el número de Reynolds discutidas anteriormente. Cuando se usan diferentes gases o cuando ocurren variaciones significativas en la presión, existirá un error en la medición de caudal que puede representar un porcentaje representativo.

Cuando se piensa operar con diferentes gases, es absolutamente necesario que la calibración se base en el enfoque del número de Reynolds.

Figura 10. LFEs con sistema electrónico de adquisición y procesamiento de datos



Cortesía: CME / Division of Aerospace Control Products, Inc.

Los fabricantes de LFEs han aprovechado los avances en electrónica, microprocesadores e instrumentación para desarrollar sistemas de medición de gas computarizados, integrados en un paquete. Estos equipos procesan las señales de los sensores integrados para obtener la información de presión absoluta, diferencial y temperatura necesaria para calcular e indicar el caudal en diferentes formatos, de acuerdo con los requerimientos del usuario. Es común que la forma en que el software manipula las variables para mostrar el caudal sea una incógnita para los usuarios: ¿Qué modelo usa el sistema para representar el desempeño del LFE?, ¿Cómo se calculan las propiedades del gas (*especialmente la viscosidad*)?, obviamente, algunos usuarios no estarán concientes o no apreciarán la conveniencia de

disponer del dato de caudal en tiempo real, pero por otra parte, aplicaciones que involucran el uso de métodos y procedimientos documentados, como por ejemplo para uso en laboratorios de calibración, pueden requerir que todas las técnicas de cálculo, fórmulas y tablas que contenga el software estén abiertas al usuario para propósitos de evaluación y preferiblemente permitan su modificación.

1.6. CONCEPTOS DE APLICACIÓN

Debe tenerse en cuenta que a pesar de que existen diferentes formas para presentación de datos o de que la indicación computarizada del sistema puede usarse para determinar el caudal másico, los LFEs no responden en forma directa al caudal másico. Vale la pena recordar que la mayor parte de la presión diferencial es generada por fuerzas viscosas al interior de la sección del medidor. Estas fuerzas de fricción no dependen de la densidad del gas, pero sí del producto entre la viscosidad del gas y el caudal volumétrico a las condiciones del flujo (*producto de la velocidad del flujo por el área*) de gas pasando a través del medidor. La viscosidad del gas es dependiente en gran medida de la temperatura pero, a diferencia de la densidad, se altera muy poco por la presión. De acuerdo con el nivel de presión del gas, y por lo tanto de su densidad, normalmente tendrá poca influencia sobre la relación entre Q y la presión diferencial para un medidor operando con un gas específico a una temperatura constante.

Aparte de los efectos del número de Reynolds, el producto de la viscosidad del gas por el caudal volumétrico es el factor fundamental que determina la presión diferencial generada por un LFE. Cuando se opera con un gas específico a una temperatura constante (*viscosidad constante*), solamente los cambios en la velocidad del gas, en comparación con los cambios en su densidad o nivel de presión, afectarán la presión diferencial.

Para ilustrar esta idea desde otra perspectiva, considere que un LFE operando a una presión absoluta de 100 kPa generará una determinada caída de presión ΔP cuando pasa un caudal másico específico. Ahora, asuma que el medidor soporta un incremento de presión absoluta a un valor de 200 kPa, manteniendo el mismo caudal másico. Lo que ocurrirá es que ΔP (*la señal de salida*) caerá drásticamente a la mitad de su valor original. La explicación de este fenómeno es que el caudal másico es igual al producto de Q y ρ . Al doblar la presión, la densidad del gas ρ se incrementa al doble. Esto exige que el valor de Q , y por lo tanto su correspondiente ΔP , se reduzca a la mitad para sostener el mismo caudal másico.

La forma en que se expresan los caudales es un aspecto que reviste particular importancia, especialmente al momento de seleccionar un medidor. Los fabricantes de LFEs a menudo especifican el intervalo de medición de sus instrumentos usando un conjunto de condiciones estándar, base o de referencia. En Norteamérica la mayoría de fabricantes han adoptado una temperatura de 70°F (21,1°C) y una presión de 1 atmósfera estándar (101,325 kPa) como conjunto de condiciones de referencia, especificando en forma correspondiente

el desempeño de sus productos. Como se estudiará posteriormente, los fabricantes de LFEs ofrecen una amplia diversidad de modelos, cada uno de los cuales está diseñado para producir el perfil de flujo laminar apropiado, al interior de sus secciones centrales.

Cuando se interpretan datos de calibración que se han expresado en forma simplificada, bajo la forma de tablas o figuras de Q (a condiciones estándar) contra ΔP es posible que se generen problemas. Los usuarios pueden asumir que Q es igual a Q_{std} , puesto que tanto la presión como la temperatura de referencia son las mismas o muy cercanas, y suponen que existe una relación fija entre ΔP y Q_{std} , es decir, caudal másico.

Otro aspecto que pueden encontrar los usuarios de LFEs se relaciona con la posición sobre la cual se define el caudal volumétrico a condiciones del flujo Q . Los datos de calibración pueden presentarse considerando el caudal a las condiciones de la entrada, de la salida o del punto medio del LFE. Estos tres formatos se refieren a la posición, relativa al elemento de flujo laminar, usada para definir la presión absoluta P , la cual a su vez establece la base para ρ , y consecuentemente para Q . Los caudales a la entrada están definidos por P , medida sobre la toma de presión aguas arriba del medidor. Los caudales a la salida están referenciados a la presión absoluta medida sobre la toma de presión aguas abajo. La presión del punto medio es el promedio de las dos anteriores, determinándose en la práctica adicionando la mitad de la presión diferencial ΔP a la presión absoluta medida en la toma de presión aguas abajo, o sustrayendo la mitad de ΔP a la presión absoluta medida en la toma de presión de la entrada. El uso de uno u otro formato depende de la forma en que se calibra y de la preferencia del usuario.

Por ejemplo, si en un sistema de flujo se instala un medidor descargando a la atmósfera, puede resultar conveniente tener los datos de calibración basados en la condición de salida. Alternativamente, una calibración basada en la condición de entrada puede ser apropiada para medidores operando con aire atmosférico, instalados a la entrada de un sistema con bomba de vacío. Esta situación es representativa de aplicaciones militares en las cuales se emplean los LFEs como patrones de referencia en la calibración de bancos de prueba diseñados para verificar los reguladores de los sistemas de respiración de pilotos a altitudes simuladas.

Cuando uno de los extremos del LFE está abierto a la atmósfera, es natural imaginar que la presión absoluta en dicho extremo será igual a la presión atmosférica local, sin embargo, esto no siempre es cierto. Muchos medidores están diseñados con conexiones en los extremos que son más pequeñas que el mismo cuerpo del medidor para conseguir adaptarse a los accesorios estándar de tubería o a los adaptadores para manguera o tubing. Adicionalmente, dependiendo de la localización y del diseño de las tomas de presión diferencial, pueden existir diferencias de más de 0,5% entre la presión absoluta medida sobre la toma de presión respectiva y la presión atmosférica local. Por lo tanto, es conveniente medir la presión estática sobre una de las tomas de presión, aguas arriba o aguas abajo, dependiendo de la conveniencia, aún en aquellas situaciones donde un extremo del LFE está abierto a la atmósfera.

Los datos de calibración basados en la condición denominada “*punto medio*” se reservan usualmente para medidores que servirán como patrones. Estos medidores se usan en la calibración de otros tipos de medidores de gas y a menudo se operan con diferentes gases. En la obtención de la expresión para la presión diferencial que se mostró en la Ecuación 8, se emplearon los valores “*promedio*” de ρ y Q para combinar los componentes asociados a la pérdida de presión en un solo término. Estos valores promedio están definidos por la presión absoluta y la temperatura que presumiblemente existe en el centro del LFE, a la mitad de la trayectoria entre las tomas de presión diferencial. La temperatura del gas que fluye no cambia significativamente al pasar a través del LFE. Esta puede medirse usando un sensor posicionado por encima o por debajo del medidor, e inclusive en su interior, algunos modelos están equipados con una conexión auxiliar para este propósito. La presión promedio, o presión en el punto medio, se determina como se explicó anteriormente. Se ha encontrado que los datos de calibración basados en la condición del punto medio, en lugar de la entrada o la salida, proveen la mejor descripción del desempeño del LFE, a lo largo de un intervalo de condiciones de operación.

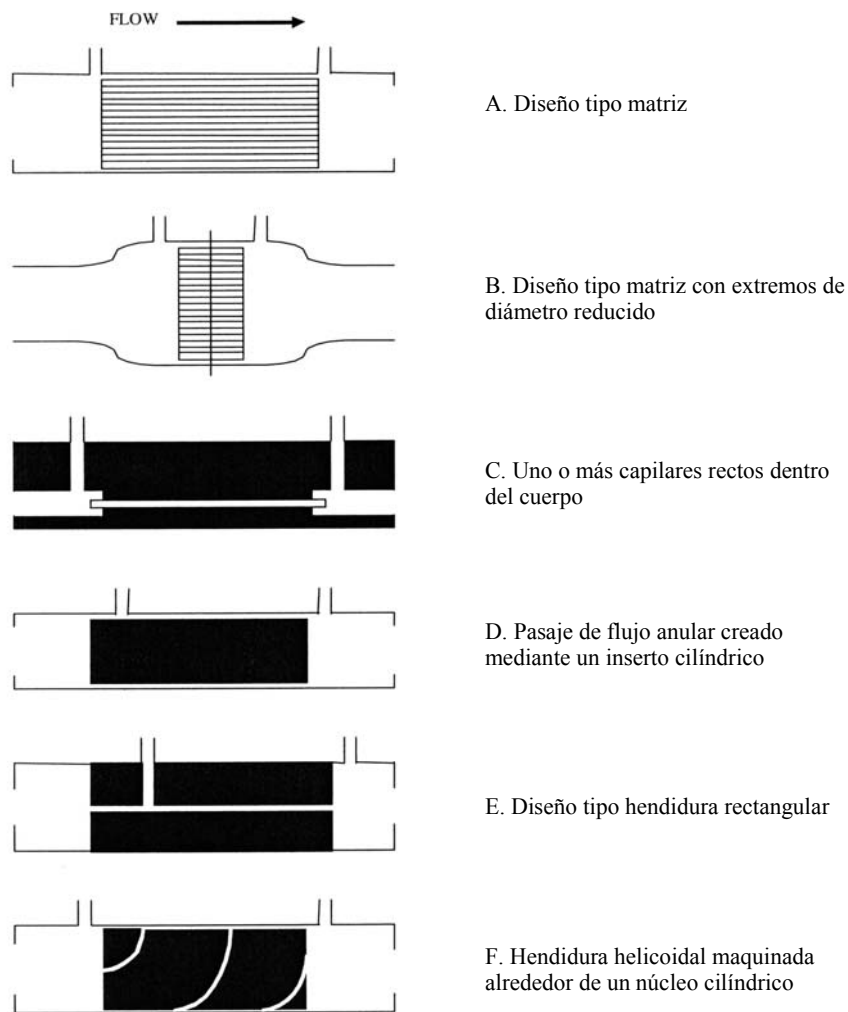
1.7. DISEÑOS DE ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR

Una de las características más interesantes de los LFEs es la variedad de configuraciones básicas de diseño que se han desarrollado para lograr una operación satisfactoria en un amplio rango de aplicaciones. En forma general, los modelos estándar aparecen en los catálogos de fabricantes desde diámetros de 1/8 de pulgada hasta 16 pulgadas, cubriendo el intervalo de caudal volumétrico de 0,5 cm³/min hasta 3800 m³/h (*FS*). Un rápido cálculo, basado en las propiedades del aire a temperatura ambiente y presión atmosférica revela que el flujo en el tubo a la entrada de estos medidores puede tener números de Reynolds menores a 1 y hasta de 400 000. Una consideración importante de diseño, al menos para las unidades de tamaño mediano y grande, es la transformación del perfil turbulento entrante a un perfil laminar. En los medidores más pequeños esta situación es menos crítica. Aún a pesar de que el flujo a la entrada puede ser laminar, este debe acondicionarse de forma que se alcance un determinado valor de presión diferencial a la condición de máximo caudal. Los principales objetivos del diseño de los LFEs son alcanzar un perfil de velocidades de flujo laminar lo más completamente desarrollado posible dentro de la sección central y obtener un determinado valor nominal de presión diferencial al caudal volumétrico establecido como máximo para el diseño, usando un gas específico y a unas condiciones de presión y temperatura determinadas. Los aspectos secundarios relacionados con la construcción del medidor involucran el tipo de conexiones a usar en sus extremos y el intervalo operación de presión y temperatura.

Poco después de su introducción como alternativa de instrumentos de medición, aparecieron numerosos diseños de LFEs. Algunos demostraron ser exitosos y aún se encuentran en uso. Otros fueron abandonados por una u otra razón, y fueron reemplazados por versiones mejoradas. Los modelos fabricados actualmente por empresas reconocidas

son diseños maduros que no han cambiado apreciablemente en muchos años. La mayoría de estos estilos populares se describe en los siguientes párrafos.

Figura 11. Diseños y configuraciones comerciales típicas de LFEs



Quizás el diseño más común de LFE es el que se presenta en la Figura 11-A. Este tipo de construcción se usa para diámetros grandes, donde el flujo en la tubería es turbulento por naturaleza. La sección central consiste de una matriz de pasajes de flujo paralelos y nominalmente idénticos. La matriz usualmente se forma enrollando sobre un núcleo cilíndrico sólido un “emparedado” hecho a partir de capas alternadas constituidas por láminas delgadas de acero inoxidable, intercalando láminas planas con corrugadas. Tanto en secciones rectangulares como triangulares, dependiendo del fabricante, los diámetros hidráulicos efectivos de los pasajes obtenidos son muy pequeños (*del orden de unos*

cuantas centésimas de milímetro). El flujo laminar ocurre dentro de cada pasaje y a lo largo de su longitud. Este diseño es versátil en cuanto a que los medidores pueden contener matrices con cientos e incluso miles de pasajes, siendo fabricados mediante las mismas técnicas constructivas.

En general, la presión diferencial es medida usando tomas para presión estática localizadas sobre el cuerpo principal del medidor, inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la sección que contiene la matriz. Un fabricante emplea tomas de presión estilo Pitot (Figura 12) que miden una porción del primero y último términos " ρQ^2 " en la Ecuación 7. Como se describe en [5], estas tomas se ajustan durante la manufactura para minimizar la constante K que aparece en la Ecuación 8, de este modo se alcanza una relación más lineal entre el caudal volumétrico a las condiciones del flujo y la presión diferencial. Los LFEs del diseño típico de matriz ilustrado en la Figura 11-A normalmente son suministrados con conexiones roscadas tipo hembra en sus extremos, pero también están disponibles con los extremos bridados o rectos en el caso de que sean para conectar a mangueras flexibles.

Figura 12. Diseño tipo matriz con tomas de presión diferencial tipo Pitot



Cortesía: CME / Division of Aerospace Control Products, Inc.

Una versión modificada del diseño tipo matriz se presenta en la Figura 11-B. Este estilo es producido por un fabricante y está destinado a aplicaciones de alto caudal a presiones relativamente bajas. Una matriz se posiciona en el centro del medidor, en su interior, entre un par de cubiertas simétricas, usando una especie de unión bridada. El uso de diámetros reducidos en sus extremos permite la medición de altos caudales para un determinado tamaño. Estos LFEs están disponibles con extremos rectos para conectar a mangueras o con extremos bridados. Adicionalmente, debido a que estos medidores son usados frecuentemente en el monitoreo de flujos en motores de automóviles, pueden suministrarse con filtros a la entrada, instalados desde fábrica.

Los diseños tipo matriz central son la norma para los medidores con un alcance de medición por encima de $30 \text{ dm}^3/\text{min}$, pero también pueden encontrarse en medidores con la décima parte de esta capacidad. Los LFEs más pequeños se construyen fundamentalmente

son secciones centrales que comprenden un único pasaje de flujo. Aquí el problema no es tanto la tarea de convertir un perfil turbulento en laminar, sino incrementar la velocidad del gas para generar una caída de presión significativa al tiempo que se sostiene un verdadero flujo laminar al interior del medidor.

Un tipo de diseño para bajos caudales se ilustra en la Figura 11-C. En esta versión prototípica del LFE, uno o más tubos capilares rectos se posicionan dentro de un cuerpo de forma externa rectangular. Las tomas de presión diferencial se conectan a las cámaras en sus extremos. Este diseño es usado para LFEs con caudales de 1 dm³/min a 5 cm³/min (*FS*).

El diseño mostrado en la Figura 11-D emplea un inserto cilíndrico sólido instalado concéntricamente dentro de otro cuerpo cilíndrico hueco. El gas fluye a través de la región anular creada entre el inserto y el cuerpo. Los LFEs con caudales de 3 a 30 l/min (*FS*) se producen usando este diseño, el cual traslapa el intervalo de operación de los medidores tipo matriz descrito anteriormente. Para alcanzar bajos caudales manteniendo una presión diferencial moderada, se usa el diseño de la Figura 11-E. En lugar de un pasaje de flujo anular, una única hendidura poco profunda forma la sección central. Este estilo ha sido usado por un fabricante de medidores con caudales de 0,1 a 3 dm³/min (*FS*).

Note que en la Figura 11-D y en la Figura 11-E, la posición de la toma de presión aguas arriba está dentro de la sección central, buscando mejorar la linealidad de la relación básica entre Q y la presión diferencial, y también excluir de la presión diferencial medida aquel incremento en la caída de presión asociado con los primeros dos términos de la Ecuación 7. Desde todo punto de vista, ésta es una aproximación exitosa. Los LFEs del tipo mostrado en la Figura 11-E, usualmente presentan variaciones muy pequeñas en el parámetro $\Delta P/\mu Q$ (*Ver Figura 8*) cuando se comparan con medidores de similar capacidad pero contruidos como se muestra en la Figura 11-C.

El diseño de la Figura 11-F es usado por uno de los principales fabricantes para la producción de sus modelos de menor capacidad, cubriendo el intervalo de caudales de 10 a 100 cm³/min (*FS*). Una única ranura poco profunda y en forma de hélice, se maquina sobre la superficie de un núcleo sólido metálico, el cual se instala posteriormente con un ajuste muy preciso dentro de un cuerpo cilíndrico usando una técnica de ajuste por contracción. El pasaje de flujo resultante, con forma de espiral, ofrece una alta presión diferencial para una determinada longitud total del medidor, en comparación con los diseños rectos tradicionales.

Todos los LFEs mostrados en la Figura 11 han sido usados por décadas y representan los modelos que se encuentran disponibles en el mercado actual de medidores basados en esta tecnología. Estos diseños representan un panorama de los tipos de medidores que se usan ampliamente en la industria. En su gran mayoría, estos modelos poseen buenos registros de desempeño como medidores de caudal confiables, con algunas pocas excepciones.

Algunos medidores con diseño tipo matriz pueden presentar desviaciones en su desempeño debido a inestabilidades en la misma matriz. Esta desafortunada circunstancia ha sido observada por usuarios así como en los laboratorios de calibración, ocasionando una mala reputación en algunos círculos. El problema (*cuando ocurre*) no se asocia necesariamente a las condiciones de uso, pero si a defectos en su construcción. Si durante la manufactura, la matriz no se asegura completamente al medidor, o el medidor sufre choques excesivos (*quizás por caídas*), pueden ocurrir cambios en la geometría interna. A menos que la matriz esté firmemente configurada y bloqueada al interior del medidor para evitar que rote, cualquier alteración de la forma o de la distribución de los pasajes de flujo ocasionará diferencias en el desempeño del medidor. Es difícil decir de antemano cuales LFEs con diseño tipo matriz presentarán eventualmente un comportamiento deficiente. Los laboratorios de calibración familiarizados con LFEs pueden ser capaces de identificar cuales modelos son más susceptibles a este problema. Por ahora, solamente después de calibraciones sucesivas puede detectarse la existencia de anomalías potenciales.

Muchas versiones estándar de LFEs están diseñadas para crear presiones diferenciales de 1 a 2,5 kPa a FS bajo condiciones normales de operación. Este intervalo de presión diferencial fue establecido originalmente hace muchos años, cuando la única instrumentación disponible para la ejecución de mediciones exactas de presiones diferenciales bajas consistía en diferentes tipos de manómetros de columna de líquido y manómetros de carátula muy sensibles. Otro factor importante involucra la caída total de presión a través del medidor. En procesos de medición de caudal, así como en aplicaciones de bancos de ensayo, la pérdida total de presión a través de la instalación es un factor decisivo. La opción de usar LFEs, con su relativamente baja caída de presión y respuesta lineal, fueron aspectos atractivos para los diseñadores y actualmente se conserva esta orientación.

El desarrollo de los transductores electrónicos de presión contribuyó en gran medida a aumentar la popularidad de los LFEs. Un medidor puede instalarse remotamente, eliminando la necesidad de observar la indicación de un manómetro. Otro aspecto importante es que la señal de presión puede usarse como retroalimentación en un lazo de control, por ejemplo para controlar una válvula en forma automática, manteniendo fijo el caudal. Adicionalmente, no se requiere la extracción de raíz cuadrada a la presión diferencial, como sucede con los medidores comunes basados en presión diferencial.

La constante evolución de los transductores de presión ha tenido un impacto sobre los fabricantes de LFEs. Incluso las compañías cuyo principal producto son los instrumentos para medir presión han expandido sus líneas para incluir LFEs. Como resultado de esta sinergia han aparecido nuevos tipos de LFEs, algunos de los cuales presentan diferencias significativas de los diseños tradicionales.

En el mercado actual existen modelos que operan a presiones diferenciales muy bajas, del orden de 100 Pa a FS. Por otra parte, se han desarrollado medidores que generan valores de presión diferencial de hasta 50 kPa. Estos modelos que operan a alta presión diferencial (*Figura 13*) se construyen usando un diseño tipo inserto anular, similar al mostrado en la

Figura 11-D y están destinados a operar en conjunto con un paquete de instrumentación por separado, formando un sistema automatizado de medición de caudal de gas. Aunque no es el único en ofrecer este sistema (*otros fabricantes ofrecen alternativas similares*), la característica interesante de esta combinación es la forma en que se mide la presión diferencial. En lugar de asociar un único transductor de presión diferencial, se usan dos sensores independientes de presión absoluta de alta exactitud, los cuales están contenidos dentro del paquete de instrumentación. Estos se conectan a la entrada y a la salida del LFE, y se asume su diferencia como ΔP . El paquete de instrumentación también procesa las señales de temperatura, provenientes de sensores instalados en el cuerpo del LFE.

Figura 13. Sistema de medición basado en LFEs de alta presión diferencial



Cortesía: DH Instruments Inc.

1.8. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

Todos los LFE requieren ser calibrados en un laboratorio, comparando sus indicaciones de caudal contra las obtenidas a partir de patrones apropiados, con el fin de determinar con exactitud el desempeño del medidor. El método de calibración puede basarse en la comparación contra patrones primarios o secundarios de caudal de gas. La selección de la técnica de calibración depende fundamentalmente de dos factores: 1) costo y, 2) nivel de incertidumbre requerida.

El hecho de que los LFE no son instrumentos de lectura directa también tiene una influencia significativa, puesto que se requiere el uso de algún tipo de indicador de presión diferencial. Por lo tanto, el desempeño del instrumento de ΔP tiene un impacto significativo sobre el nivel de incertidumbre asociado a los datos de la calibración, así como la incertidumbre asociada a la repetibilidad observada sobre mediciones sucesivas de

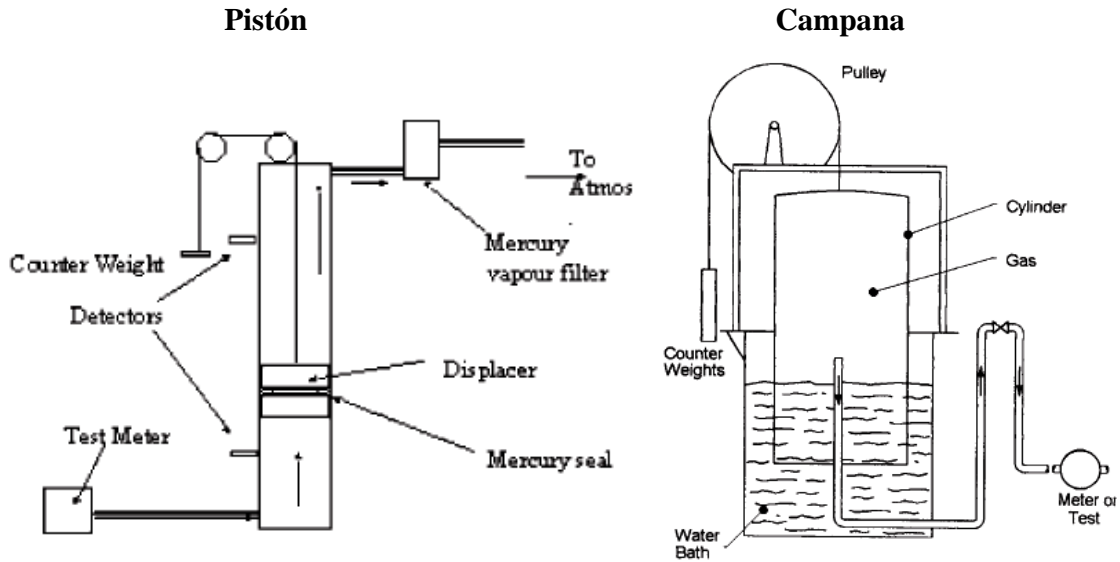
caudal usando el instrumento. Por ejemplo, suponiendo que un LFE fue calibrado contra un patrón primario de caudal de gas, usando un sofisticado transductor de presión diferencial, con incertidumbre de 0,05% de la lectura, esta combinación puede resultar en una incertidumbre de medición de caudal de 0,25% a 0,35% de la lectura (*a un nivel de confianza del 95%*) para una caracterización tal como la que se representa en la Figura 9. Este nivel de desempeño no puede alcanzarse si el usuario utiliza en conjunto con el medidor, un instrumento para medir presión diferencial con un desempeño de 2% FS. El punto es que la incertidumbre de los datos de la calibración del LFE, independiente de su fuente, no puede ser mejor que la incertidumbre del instrumento para medir presión diferencial ΔP . Los usuarios cuyas aplicaciones exigen tolerancias muy estrechas, del orden de 0,5% de la lectura o menores, deberán investigar en primera instancia un buen instrumento de presión diferencial antes de enviar el LFE a un laboratorio de calibración acreditado que posea patrones primarios.

Prácticamente cualquier LFE bien construido tiene el potencial de ser calibrado con una incertidumbre inferior a 0,5% de la lectura. Sin embargo, en muchas aplicaciones no se requiere un nivel tan bajo. Quizás la selección del LFE se basa en la relación lineal entre caudal y presión diferencial, baja caída de presión o algún otro atributo. En estas situaciones el usuario puede optar por una calibración menos costosa, involucrando una comparación contra un patrón secundario.

Los fabricantes usualmente suministran los LFE junto con los datos obtenidos de una calibración por comparación contra un patrón de trabajo que usualmente es otro LFE el cual ha sido calibrado en un laboratorio y posee trazabilidad, de esta forma se calibran los medidores producidos. Las incertidumbres típicas de los medidores calibrados por fabricantes están entre 0,75% y 2% de la lectura. Los laboratorios de calibración independientes (*de tercera parte*) también pueden utilizar esta técnica de comparación. Los LFE de mayor tamaño pueden calibrarse con toberas de flujo crítico u otros patrones secundarios. En estos casos, las incertidumbres de medición oscilan alrededor de 0,5% de la lectura.

Hay tres tipos básicos de patrones primarios de caudal de gas, usados en la calibración de LFE, así como de otros tipos de medidores. Los primeros dos se clasifican como sistemas volumétricos y el tercero como gravimétrico. Los sistemas volumétricos más tradicionales se basan en patrones de desplazamiento positivo tipo pistón y tipo campana (*Figura 14*). Estos patrones almacenan un volumen conocido de gas, a presión constante, a través de un intervalo de tiempo medido. A través de mediciones exactas de la presión y la temperatura del gas al interior del volumen almacenado, se calcula la densidad del gas de acuerdo con las ecuaciones de estado para los gases reales. Con el producto del caudal volumétrico por la densidad calculada se obtiene el caudal másico, el cual bajo condiciones de estado estacionario, es el mismo a través del sistema de flujo.

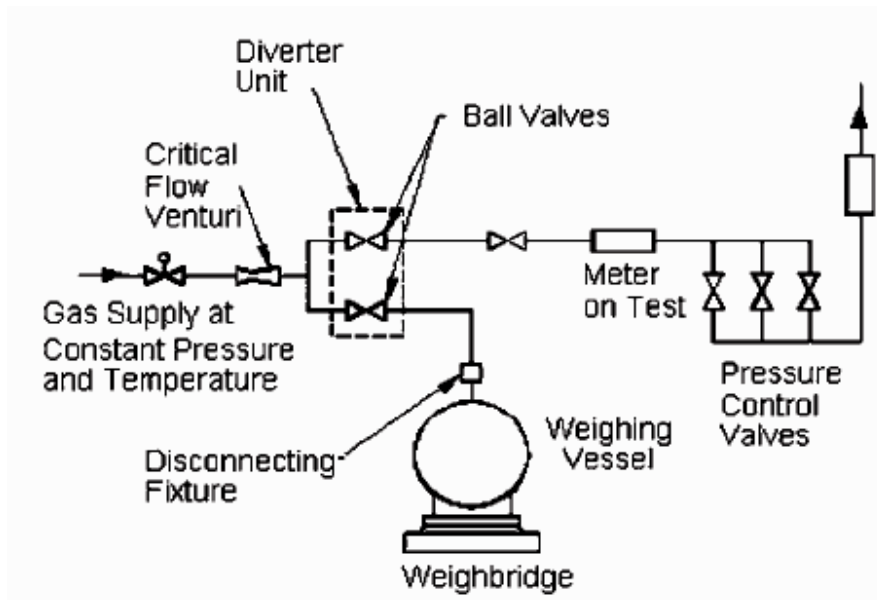
Figura 14. Sistemas de calibración volumétricos



El otro tipo de patrón volumétrico se clasifica como de volumen constante. Este sistema consiste de una cámara de volumen conocido. Usualmente, la cámara se vacía hasta alcanzar una presión absoluta muy baja en su interior antes de iniciar su operación. El gas fluye a través del medidor bajo prueba a caudal y presión constantes, llenando la cámara. Un transductor de presión absoluta extremadamente sensible monitorea el incremento de la presión al interior de la cámara. El volumen de la cámara, junto con las mediciones de temperatura en su interior, se usan para determinar el caudal de cualquiera de las siguientes dos maneras: calculando la proporción en que se incrementa la presión en tiempo real, o midiendo en intervalo de tiempo requerido para que la presión de la cámara vaya de un valor a otro. De la misma forma que en los patrones volumétricos tradicionales, la densidad del gas se determina usando ecuaciones de estado termodinámico.

La operación de los sistemas gravimétricos se basa en el principio de pesaje directo (*Figura 15*). A diferencia de los sistemas volumétricos, los dispositivos gravimétricos para medir caudal de gas normalmente operan de forma estática en vez de dinámica. Inicialmente se pesa con gran exactitud un recipiente presurizado que contiene gas, para este propósito se usa una balanza. El recipiente se conecta al sistema de flujo, de forma tal que se permita que el gas pase del recipiente al medidor bajo prueba durante un período de tiempo definido, después de dicho intervalo, se desconecta el recipiente del sistema y es vuelto a pesar. La pérdida neta de masa, dividida entre el intervalo de tiempo suministra una medición directa del caudal másico.

Figura 15. Sistema de calibración gravimétrico



1.9. CONSIDERACIONES DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN

La operación satisfactoria de los LFEs puede asegurarse mediante el cumplimiento de una serie de consideraciones. En primera instancia, debe garantizarse que el gas esté libre de partículas sólidas y lo suficientemente seco como para evitar la condensación al interior del sistema. Los LFEs están contruidos con pasajes de flujo muy pequeños en los que la más ligera deposición de material extraño ocasionará una alteración en su desempeño. Los diseños tipo matriz son muy vulnerables al daño por el choque con partículas a alta velocidad que pasan a través de la tubería. Aún cuando se les realice limpieza, de acuerdo con las instrucciones del fabricante, su desempeño cambiará con respecto a un estado anterior si la matriz se ha afectado. La única forma de solución en estos casos es una recalibración.

Los LFE usados en aplicaciones de medio a bajo caudal se operan frecuentemente con gases puros contenidos en cilindros de alta presión. Normalmente estos gases vienen secos y filtrados por el proveedor, sin embargo, se recomienda usar algún tipo de filtración aguas arriba del medidor para eliminar la posibilidad de ingreso a material particulado que pueda contaminar el LFE.

Las facilidades industriales poseen comúnmente aire comprimido a través de una red de tuberías, involucrando un compresor. Debe tenerse extremo cuidado con el uso de este aire. Como primera medida, se requiere adecuar un proceso de secado a la presión equivalente al punto de rocío, de forma que no condense el vapor de agua a las condiciones de operación. Adicionalmente, es necesario instalar filtros de partículas, teniendo el

cuidado de remover trazas de aceite y vapores de aceite que puedan estar suspendidos en el aire. Este último aspecto es de suma importancia. Se han encontrado LFEs cubiertos en su interior por una fina capa de lubricante de compresor, lo suficiente para desviar su desempeño característico en más de un 3% al año.

La necesidad de extensas longitudes de tubería recta aguas arriba de los LFE no es tan importante como en el caso de otros tipos de medidores. Sin embargo, el desempeño de muchos LFEs se afecta en algún grado por la configuración de la tubería usada. Pruebas informales realizadas en el U. S. Navy Primary Standards Laboratory, al principio de la década de 1980, reveló que no existen diferencias significativas para medidores pequeños (*de 1/8 y 1/4 de pulgada*) cuando se probaron usando varios arreglos de tubería aguas arriba. Incluso los codos dispuestos a la entrada del medidor mostraban un efecto despreciable. Sin embargo, no se presentó el mismo resultado en los medidores mayores. A altos caudales, las variaciones en la distribución del perfil de velocidades del flujo turbulento a la entrada, justo aguas arriba de tener contacto con la sección que contiene la matriz, ocasionadas por diferentes arreglos de tubería, mostraron cambios en la forma de la curva ilustrada en la Figura 9. El propósito de estas pruebas no fue determinar correcciones cuantitativas que puedan aplicarse basadas en determinados tipos de arreglos de tubería, sino simplemente demostrar cuándo las diferentes configuraciones de tubería tienen o no algún efecto cuantificable sobre el desempeño del LFE.

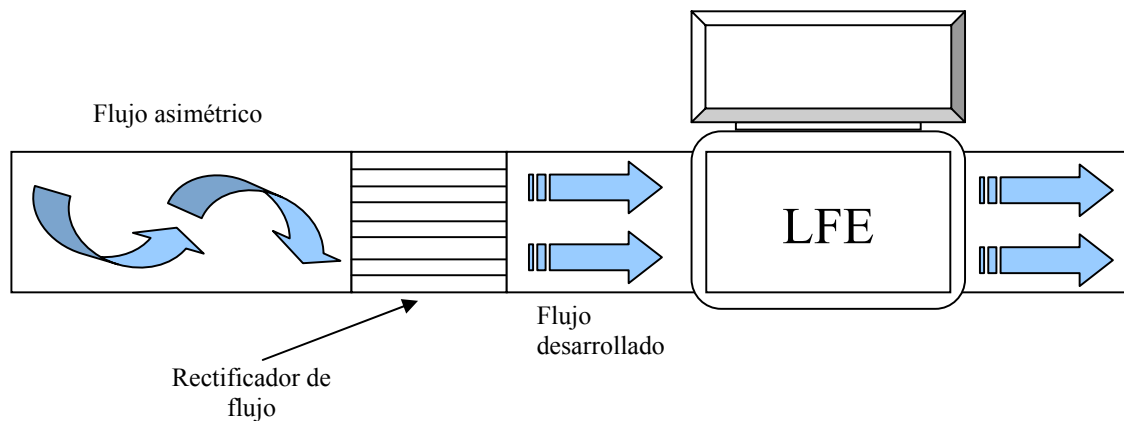
Debido a que los resultados de estas pruebas revelaron la existencia de estos efectos, se reconoció que debía estandarizarse algún tipo de configuración de tubería, con la finalidad de adoptarlo para la ejecución de calibraciones y para su posterior operación por parte de los usuarios. Para los medidores equipados con extremos de tubería recta para uso con mangueras flexibles y para aquellos con extremos bridados, la selección de las conexiones en sus extremos y el diámetro de las mismas está previamente establecido. El verdadero problema aplica a aquellos medidores con conexiones roscadas tipo hembra. A menos que el usuario haya instalado algún tipo de arreglo de tubería en sus extremos, queda a discreción del laboratorio de calibración, la forma en que se conecte el medidor al patrón, siendo esta situación perjudicial para la reproducibilidad de los resultados de medición.

El uso de rectificadores de flujo aguas arriba, con el fin de remover las asimetrías del perfil de velocidades del flujo, como por ejemplo el “*swirl*”, fenómenos que repercuten en la exactitud de las mediciones, es un medio eficaz para lograr este propósito. Los rectificadores son elementos comunes en sistemas de medición por turbina y los proveen la mayoría de fabricantes de este tipo de medidores. Estos elementos pueden ser usados sin ningún problema en los LFEs. En la Figura 16 se muestra un ejemplo de instalación con uso de rectificadores.

Comercialmente hay disponibles conexiones de tubing recto aguas arriba y aguas abajo, con rectificador incorporado; la implementación de estos dispositivos es una práctica que trae dos beneficios. En primer lugar, estos accesorios pueden dejarse instalados permanentemente sobre el medidor, eliminando de esta forma la posibilidad de contaminación por residuos de sellador para rosca cada vez que se instala el medidor. En

segundo lugar, se fija una configuración de tubería estandarizada para la calibración y la operación.

Figura 16. Uso de rectificadores/acondicionadores de flujo



El concepto de estandarizar la instalación de los LFE en cuanto a la configuración de la tubería, aplica también en aquellos casos donde un extremo está abierto a la atmósfera. Los medidores de gran tamaño, usados por ejemplo para la medición de flujos en motores de automóviles los suministran usualmente con filtros de aire instalados de fábrica. Estos LFE deben calibrarse con el filtro instalado en su lugar, en forma adicional al arreglo de tuberías para asegurar la exactitud de la instalación. Otros medidores no equipados con filtros de aire o que normalmente descargan a la atmósfera, medirán en forma más confiable si los accesorios de los extremos, usados para la calibración, se conservan durante su operación. Manteniendo la misma geometría se asegura el desempeño de cualquier LFE, eliminando cualquier componente de variabilidad asociada con los efectos de la tubería.

Cualquier accesorio, así sea un adaptador de tubería, un reductor o un conector de manguera, cuando se rosca al extremo del LFE, crea una geometría particular que afecta el perfil de velocidades del flujo y consecuentemente su desempeño.

A menos que se haya adquirido junto con el LFE, uno de los paquetes de instrumentación automatizados, será necesario incluir instrumentos para medir la presión diferencial, la presión estática absoluta y la temperatura del gas. La selección de esta instrumentación auxiliar deberá basarse en el nivel deseado de incertidumbre de medición y de acuerdo con la necesidad de monitoreo de la señal o de interfaz vía computador.

Actualmente se cuenta en el mercado con excelentes instrumentos para medir presión diferencial, algunos con la capacidad de discriminar 1 parte en 10 000 de la presión diferencial total a la que opera el LFE. Sin embargo, los usuarios deberán estar enterados de que la mayoría de transductores de presión diferencial e indicadores tienen una presión estática máxima de operación, así como un intervalo de sobrecarga de presión. Adicionalmente, muchos presentan un efecto de acuerdo a la presión estática, de forma que

su desempeño varía en relación a la presión absoluta existente sobre el lado de baja presión, o lado de referencia. Si un LFE será operado a una presión relativamente superior a 1 atmósfera, el dispositivo usado para medición de presión diferencial deberá ser de aquel tipo que es relativamente insensible a los efectos de la presión estática, o de otra forma deberá calibrarse a la misma presión estática a la cual operará.

Aparte de la presión diferencial, la medición de la temperatura del gas juega un papel muy importante en la operación de los LFEs. La razón es que la temperatura afecta la densidad del gas γ , en forma más relevante, su viscosidad. Como se mostró anteriormente, en la Figura 6, debe recordarse la forma como participa la viscosidad dentro de la relación fundamental entre el caudal y la presión diferencial. Las viscosidades típicas de los gases que se utilizan en la industria cambia de 0,2% a 0,3% por cada grado Celsius $^{\circ}\text{C}$. Esta razón de cambio de la viscosidad con la temperatura en esencia representa el coeficiente de temperatura de la indicación de caudal volumétrico de un LFE. En los cálculos de caudal, donde se tiene el producto entre Q y ρ , los efectos de la temperatura están mezclados. Los cambios en la densidad del gas son de aproximadamente 0,34% por $^{\circ}\text{C}$, a temperatura ambiente normal. Por ejemplo, cuando se opera con aire a 23°C , un error de 1°C en la medición de la temperatura del aire genera un error de 0,34%. Puesto que la temperatura es una de las variables que afectan la incertidumbre global de medición, debe dirigirse especial atención hacia este aspecto de la operación de los LFEs. Una combinación de sensor e indicador de temperatura apropiados, con una incertidumbre inferior a $0,15^{\circ}\text{C}$ debería usarse si el objetivo es mantener una incertidumbre de medición global de caudal másico de 0,5% o menos.

Algunos LFEs vienen equipados con un puerto diseñado para insertar un pequeño sensor de temperatura. Sin embargo, en ocasiones esta facilidad no está incorporada al medidor y como consecuencia, el usuario debe disponer de algún medio para obtener la temperatura del gas. Insertar un sensor dentro de la corriente del flujo, a través de una toma instalada en la pared del tubo cercana al medidor, preferiblemente aguas abajo, puede ser una solución para los medidores grandes. En los medidores pequeños esta solución puede resultar impráctica por dos razones: primero que todo, no hay suficiente espacio en la tubería para instalar el sensor; en segunda instancia, toda la extensión del sensor de temperatura debe estar en contacto directo con el medio para minimizar los efectos de conducción, o de efecto de aleta. El uso de un accesorio tipo “ T ” en la salida del LFE o muy cerca a ésta es una opción recomendada para aquellos medidores que no están equipados con un puerto para medición de temperatura. Un pequeño sensor tubular, como por ejemplo un termistor o un termopar puede insertarse a través de un accesorio a compresión, unido a la “ T ”, de este modo se expone una buena porción del sensor al gas que fluye. Los sensores de resistencia de platino RTD, a pesar de que son lo suficientemente exactos, generalmente requieren una gran profundidad de inmersión que normalmente no está disponible en los medidores de tamaños pequeños. Además, en el ambiente de baja densidad y velocidad de gas en el cual operan los LFEs, la masa del sensor es relativamente alta, contribuyendo a la generación de un tiempo de respuesta bajo.

1.10. VISCOSIDAD DEL GAS

En ninguna división del campo de la medición de caudal a nivel industrial existe un gran énfasis sobre el conocimiento preciso de la viscosidad absoluta o dinámica, como ocurre en el caso de la operación y calibración de los LFEs. Las viscosidades de los gases no se miden siguiendo la misma rutina que en el caso de los fluidos líquidos, cuyas viscosidades pueden medirse en casi cualquier laboratorio usando equipo de relativamente bajo costo. En gran contraste, la determinación de la viscosidad de los gases involucra equipos complicados que usualmente solo se poseen en universidades e institutos de investigación. Los resultados de los esfuerzos para obtener la viscosidad de los gases a menudo son de interés para publicaciones de carácter científico. Con base en estos artículos de investigaciones que aparecen en la literatura especializada, se han elaborado tablas de viscosidad de los gases para uso en la industria.

Predecir el desempeño de un LFE con un gas diferente al usado en la calibración, u operando con un solo gas en un amplio intervalo de temperaturas, no solamente requiere un conocimiento de la viscosidad del gas en relación al otro sino también de la razón de cambio de la viscosidad con la temperatura. Es importante mencionar que los valores de viscosidad publicados pueden diferir significativamente de una fuente a otra. Pueden observarse inconsistencias de más de 1% para el mismo gas a la misma presión y temperatura. Esto no es debido a inestabilidades físicas en los gases sino a la complejidad de la infraestructura necesaria para medir las viscosidades.

La capacidad para usar los LFEs efectivamente se relaciona directamente con el hecho de que los valores de viscosidad del gas sean consistentes. Estos valores necesariamente se obtienen a partir de mediciones sobre diferentes gases, realizadas con el mismo instrumento, opuesto a las tablas o ecuaciones basadas en la compilación de datos de diferentes investigadores a través de varias décadas. Durante el estudio del desempeño de LFEs descrito en [8], los errores sistemáticos inherentes en medio de las diversas referencias sobre viscosidad resultan evidentes apenas hasta hoy. De acuerdo con lo visto anteriormente, una curva de datos de calibración, usando los parámetros de la Figura 9 debería describir las características de un LFE que opera con diferentes gases sobre un determinado intervalo de números de Reynolds. Lo que se encontró fue que las curvas para diferentes gases no coinciden, pero que eran paralelas unas con otras. Además, se demostró que sus posiciones relativas variaban de acuerdo con la referencia que se usara para determinar la viscosidad del gas. Puesto que se obtuvieron las mismas tendencias usando LFEs de diferente diseño y tamaño, se observó que ajustes simples de los valores de la viscosidad del gas aparecieron en las referencias disponibles y al mismo tiempo se logró que las curvas de calibración para diferentes gases coincidieran una con otra.

Este estudio se describe en [13]. Publicaciones posteriores [14 y 15], detallan los resultados de las mediciones de viscosidad de diferentes gases usando los mismos equipos y encontrando una ligera diferencia en los valores para un gas particular al comparar estos contra [13]. Sin embargo, un aspecto notable es que los cocientes de la viscosidad de un

gas con respecto a otro, en las tres referencias, son virtualmente idénticos, difiriendo tan solo en algunas centésimas de porcentaje.

Cuando la operación de un LFE está restringida a un solo gas y se ha calibrado con dicho gas, la única preocupación del usuario es emplear la misma fórmula para calcular la viscosidad, basado en mediciones de la temperatura y la presión estática en el medidor, de la misma forma que se hizo durante la actividad de calibración. Esta precaución debe tenerse en cuenta automáticamente cuando se usa uno de los sistemas computarizados en aplicaciones para LFEs, considerando que el sistema y la calibración del medidor las provee el mismo vendedor. Los LFEs previstos para la operación con diversos gases se calibran normalmente usando uno solo (*típicamente aire o nitrógeno*), los datos del funcionamiento para otros gases se predicen usando una forma de correlación del número de Reynolds. El error adicional introducido por esta técnica será muy pequeño considerando que hay disponible información acerca de la viscosidad del gas y que la misma es confiable.

Un nuevo análisis, basado sobre aproximadamente una docena de estudios y tablas originales, con el fin de obtener un conjunto de ecuaciones simples e internamente consistentes, para calcular las viscosidades de varios gases dentro del intervalo de temperaturas y presiones de interés general para quienes usan LFEs, fue realizado a partir de varios de los documentos enumerados en las bibliografías de [13 y 14]; adicionalmente, otros documentos consultados para el desarrollo de ésta monografía son referencias citadas en los anteriores. Puesto que existe suficiente conocimiento del cociente entre la viscosidad de un gas y otro a una temperatura fija, por ejemplo 25°C, y ya estaba disponible esta información, el énfasis de este análisis estaba en encontrar mejores estimaciones del índice de cambio de la viscosidad con respecto a la temperatura.

Como resultado, se desarrolló un conjunto de ecuaciones para calcular las viscosidades del aire seco, nitrógeno, oxígeno, argón y helio a una presión de 1 atmósfera (*101 325 kPa*) y un intervalo de temperatura entre 10 y 35°C. Debido a que la viscosidad del gas no responde en forma lineal con la temperatura, fue necesario emplear ecuaciones cuadráticas para alcanzar el nivel de exactitud deseado a lo largo del intervalo de temperaturas analizado. Puesto que la influencia de la presión sobre la viscosidad del gas es pequeña, se encontró que correlaciones lineales sencillas pueden aplicarse para extender los valores hasta 4,4 atm sin una pérdida significativa en su exactitud. Las ecuaciones se presentan con la viscosidad expresada en micropoise, la unidad más común en la operación de LFEs. Un micropoise representa 10^{-6} g/cm-s, o 10^{-7} Pa-s. Se espera que las ecuaciones presentadas en la Tabla 1 brindan los valores de viscosidad del gas que, al valorarse desde una base relativa, de un gas a otro, tienen una incertidumbre de 0,1% o menos, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 1. Viscosidad a 1 atm para temperaturas de 10 a 35°C

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Aire seco	172,06	0,50487	-0,00034413
Nitrógeno	166,16	0,47989	-0,00041040
Oxígeno	191,05	0,62629	-0,00066960
Argón	209,75	0,66514	-0,00051300
Helio	186,86	0,46899	-0,00023809
$\mu = a + bT + cT^2$ $\mu = \text{micropoise}$ $T = \text{°C}$			

A cualquier temperatura dentro del intervalo tabulado, el efecto de la presión puede tenerse en cuenta multiplicando la viscosidad a presión atmosférica y a la temperatura específica por un pequeño factor de corrección, provisto en la siguiente expresión:

$$\text{Factor de Corrección por Presión} = \frac{\mu_{Patm}}{\mu_{atm}} = 1 + \beta(P - 1)$$

Ecuación 16

donde *P* es la presión absoluta en atmósferas y β es la fracción de cambio en la viscosidad por cada atmósfera de presión. La Ecuación 16 aplica para presiones de hasta 4,4 atm. Los valores de β se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Fracción de cambio en la viscosidad por variación en la presión atmosférica

	β
Aire seco	0.0007
Nitrógeno	0.0006
Oxígeno	0.0006
Argón	0.0008
Helio	-0.0001

Note el uso del término “*aire seco*” en la Tabla 1 y la Tabla 2. Dos aspectos relacionados con el aire y su uso con LFEs requieren consideración. El primero involucra la presencia de vapor de agua en el aire, es decir, los efectos de la humedad, los cuales pueden ser de varias décimas de porcentaje cuando se usa un LFE con aire tomado de la atmósfera. El otro se relaciona con el uso de aire obtenido en forma de cilindros comerciales llenados a alta presión. El aire contenido en estos cilindros puede no contener la misma composición del aire atmosférico real, para el cual están desarrolladas las tablas y ecuaciones aplicables. Como se discute en [13], las calibraciones de LFEs llevadas a cabo luego de un período de varios meses de uso con muchos cilindros de gas, incluyendo cilindros con aire envasado a

alta presión, así como de aire seco y filtrado, tomado de la red de aire presurizado por compresor; no muestran diferencias significativas en la capacidad de reproducir los resultados de calibraciones para pruebas repetitivas del mismo medidor, usando el mismo gas (*pero obtenido a partir de diferentes cilindros*), con la gran excepción para el aire envasado. La desviación estándar para calibraciones repetidas con este gas fue (*en promedio*) cinco veces mayor que la del nitrógeno, el argón e incluso el aire obtenido a partir de la red de aire comprimido. Por lo tanto, debe evitarse el uso de aire de cilindros comerciales cuando se usen LFEs y quizás también en otras actividades de metrología de fluidos.

Los efectos de la humedad sobre la viscosidad del aire se reportan en [16]. La adición de vapor de agua resulta en un decremento de la viscosidad por debajo del valor asociado al aire seco a la misma temperatura. El análisis de los datos presentado en [16] revela que, sobre un amplio intervalo de temperatura, el cociente entre la viscosidad del aire húmedo respecto a la del aire seco puede expresarse solamente como una función de la fracción molar del vapor de agua contenido en la mezcla. Para este propósito se desarrolló la siguiente ecuación:

$$\frac{\mu_{wet}}{\mu_{dry}} = 1 - 0,1199(x_w) - 0,3801(x_w)^2$$

Ecuación 17

Donde x_w es la fracción molar del vapor de agua. Esta ecuación se ajusta a los datos tabulados en [16] hasta una fracción molar de 0,062, la cual desde un punto de vista práctico corresponde a aire a presión atmosférica, a una temperatura de 40°C y una humedad relativa de 85%. Para este propósito, así como para otros que involucren el aire húmedo, la fracción molar del vapor de agua en el aire puede obtenerse con un nivel de exactitud apropiado usando la ley de Dalton:

$$x_w = \left(\frac{\phi}{100} \right) \frac{p_{w,sat}(t)}{P_{total}}$$

Ecuación 18

Donde ϕ es la humedad relativa (*porcentual*); $p_{w,sat}$ es la presión del vapor de agua saturado correspondiente a la temperatura t del aire ambiente (*bulbo seco*); y P_{total} debe expresarse en las mismas unidades. La presión del vapor de agua saturado puede determinarse a partir de unas tablas de vapor o en la mayoría de los textos sobre termodinámica o aire acondicionado.

En enero de 2003, el Grupo de Trabajo en Flujo de Fluidos de NIST comenzó a aplicar un nuevo conjunto de ecuaciones para calcular las propiedades de los gases. El objetivo de esta determinación fue unificar las correlaciones para determinación de propiedades de los fluidos para todos los patrones que trabajan en la misma área de calibración de medidores de gas, compuesta por patrones tipo PVTt, campana gasométrica y pistón. La nueva referencia brindará una forma sencilla y confiable de asegurar la trazabilidad entre las

mediciones que se realizan en el área. La base de datos se denominó “*Refprop*” [17] y cubre inicialmente las siguientes propiedades para el aire seco, nitrógeno, oxígeno, argón, helio y dióxido de carbono:

- Peso molecular
- Relación de calores específicos
- Densidad (*segundo coeficiente virial B y tercer coeficiente virial C*)
- Viscosidad, y
- Factor de flujo crítico C^*

Para la obtención de las correlaciones, el grupo de trabajo se basó en la realización de ajustes a los datos de la Circular NBS 564 [18] y al trabajo de Robert Jonson [19]. En algunos casos, como en el de la viscosidad, estas correlaciones fueron tomadas directamente del documento original, pero en otros casos se usaron ajustes realizados previamente por predecesores en NIST. Las ecuaciones usadas previamente para los cálculos de propiedades asociadas al flujo de aire están documentadas en [20].

Los nuevos algoritmos usan un conjunto de ecuaciones de la siguiente forma para ajustarse a las propiedades dependientes P y T , tomando como ejemplo la viscosidad:

Ecuación 19 $\mu = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$

Donde los coeficientes polinomiales a_i son a su vez funciones polinomiales de la presión:

Ecuación 20 $a_i = b_0^i + b_1^iP + b_2^iP^2 + b_3^iP^3$

P está en kPa y T en K. Examinando la Ecuación 19 y la Ecuación 20, se observa que se requieren $4 \times 4 = 16$ coeficientes para la correlación de cada propiedad. Los coeficientes para los cinco gases se tabularon, de forma que para cada gas el orden en que aparecen los coeficientes es: 1) B , 2) C , 3) Cp/Cv , y 4) μ . El segundo y tercer coeficiente virial, dados por Refprop son funciones exclusivas de la temperatura, no de la presión. Por lo tanto, solamente los coeficientes b_0^i son diferentes de cero y no es necesario evaluar la Ecuación 20, los valores de b_0^i pueden tomarse como los valores a_i . Sin embargo, esto no armoniza el sistema de evaluación usado para resolver el polinomio, en consecuencia, resulta conveniente aplicar el mismo modo de evaluación polinomial a todas las propiedades.

En [21] puede consultarse una descripción más detallada de las ecuaciones desarrolladas por NIST, incluyendo los coeficientes usados en las correlaciones y un algoritmo de cálculo para implementar en Mathcad.

CAPÍTULO II

2. TECNOLOGÍAS USADAS EN COLOMBIA PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS RESIDENCIALES

2.1. MEDIDOR SECO

Los medidores secos son en esencia medidores de diafragma con un diseño mejorado, de forma que poseen una mayor resolución y desempeño metrológico. Constan de cuatro cámaras de medición, las cuales están separadas por diafragmas sintéticos. Estas cámaras se llenan y se vacían alternativamente, de forma que el movimiento de los diafragmas es transmitido mediante mecanismos hasta un arreglo de bielas y manivelas que dirigen la apertura y cierre de un conjunto válvulas de corredera con las que se controla el flujo de gas, derivándolo hacia las cámaras de medición en una secuencia alternativa.

Figura 17. Patrones tipo medidor seco



Cortesía: American Meter Company

La resolución de estos medidores depende de su capacidad volumétrica, en la Tabla 3 se presentan algunas de las configuraciones comerciales disponibles.

Tabla 3. Resolución típica de los medidores secos comerciales

Capacidad	Resolución
1 dm ³	0,01 dm ³
10 dm ³	0,10 dm ³
100 dm ³	1,00 dm ³

Los medidores pueden venir equipados con un dispositivo generador de pulsos electrónicos para transmitir el volumen medido a una consola o un computador, también es usual

encontrarlos comercialmente con instrumentos secundarios para medición de temperatura y presión a las condiciones en que se mide el volumen de gas en su interior. La incertidumbre de medición es igual o mayor al 1% y su relación mínimo/máximo es del orden de 1:150. En la Figura 18 se presenta un modelo actualizado del medidor seco, incorporando medición digital de temperatura, manómetro de columna de alta resolución y adicional a la indicación analógica sobre la carátula, una salida en frecuencia para la indicación de volumen.

Figura 18. Actualización tecnológica del patrón tipo medidor seco



Cortesía: Shinagawa

En una instalación para calibrar medidores residenciales usualmente se instala el medidor seco aguas arriba del medidor bajo ensayo. Es posible instalar múltiples medidores en serie de forma que se puedan calibrar simultáneamente.

Debe tenerse en cuenta que esta tecnología posee un comportamiento y un desempeño muy similar al de los medidores a calibrar, debido a que fundamentalmente son medidores de diafragma con una resolución mayor. Por lo tanto, debe verificarse cuidadosamente que la incertidumbre global de medición asociada a la calibración basada en un medidor seco como patrón no supere los valores máximos establecidos por las normas técnicas para propósito de verificación metrológica. En el capítulo siguiente se presentará un resumen de dichos requisitos.

Este tipo de medidores es utilizado en algunas empresas distribuidoras de gas que no poseen laboratorio de calibración acreditado, con el fin de realizar chequeos rápidos del

estado de los medidores. Por poseer elementos mecánicos en permanente movimiento y fricción, con el tiempo se deteriora su estado, razón por la que hay que calibrarlos frecuentemente contra un patrón adecuado. Es una de las soluciones más económicas pero desafortunadamente posee una incertidumbre de medición que usualmente supera el límite para su uso como patrón de medidores residenciales.

2.2. CÁMARAS HÚMEDAS

Las cámaras húmedas son medidores de volumen de gas tipo desplazamiento positivo con un dispositivo de medición rotativo (*tambor*), en el cual sus cámaras de medición están selladas por un aceite mineral muy fluido y muy poco volátil como líquido sellante.

Figura 19. Patrón secundario tipo cámara húmeda



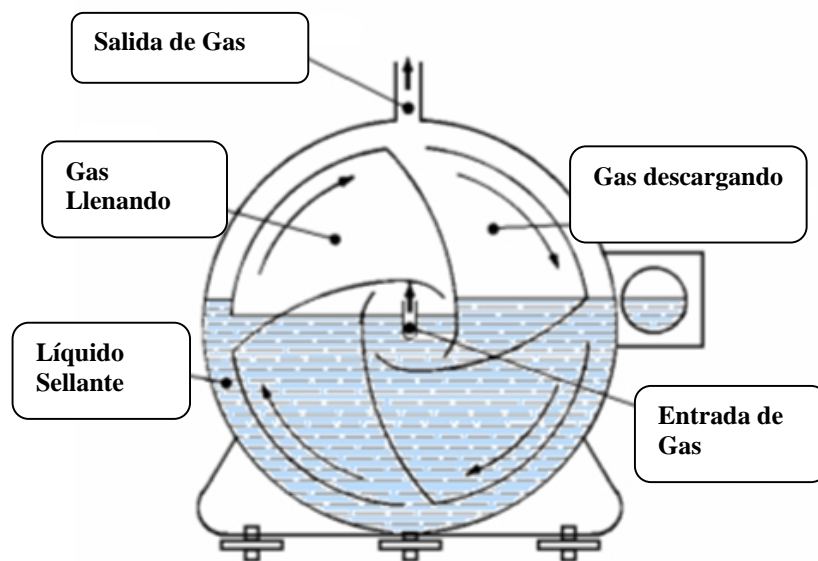
Cortesía: CDT de GAS

El paso del gas a través del medidor ocasiona la rotación del tambor interno, el volumen de cada compartimiento del tambor está cuidadosamente diseñado para que en la medida en que éstos van llenándose y vaciándose sucesivamente de gas, transmitan el movimiento de rotación hacia un indicador mecánico localizado en la carátula de la cámara húmeda, y obteniendo de esta forma la totalización del volumen de gas que pasa a través de este patrón (Figura 20).

Es posible también contar con indicación electrónica del volumen mediante una salida en frecuencia, acoplada al eje del tambor. La capacidad de sobrecarga de este patrón es baja, siendo su relación de caudal mínimo/máximo de 1:100. En caso de sobrecarga, parte del líquido sellante puede ser forzado a pasar por la salida de la cámara.

El uso de este patrón secundario es muy difundido en Colombia, la totalidad de las empresas distribuidoras acreditadas poseen cámaras húmedas. La incertidumbre de medición de estos patrones depende enormemente del patrón contra el cual se calibren, usualmente un patrón primario tipo campana gasométrica. En términos generales, la incertidumbre de medición asociada a las cámaras húmedas es del orden de 0,5%.

Figura 20. Funcionamiento de un patrón secundario tipo cámara húmeda



Cortesía: CDT de GAS

Durante la operación de las cámaras húmedas es necesario realizar un ajuste estricto del nivel de líquido sellante, de la misma forma, debe implementarse un control periódico sobre este nivel debido a que el gas fluido de calibración va arrastrando vapores de aceite, reduciéndolo y ocasionando un error en las mediciones. Un aspecto de gran importancia, relacionado con la calibración de las cámaras húmedas, es que deben calibrarse con el mismo líquido sellante que van a ser operadas para obtener resultados reproducibles entre el laboratorio de calibración y el usuario.

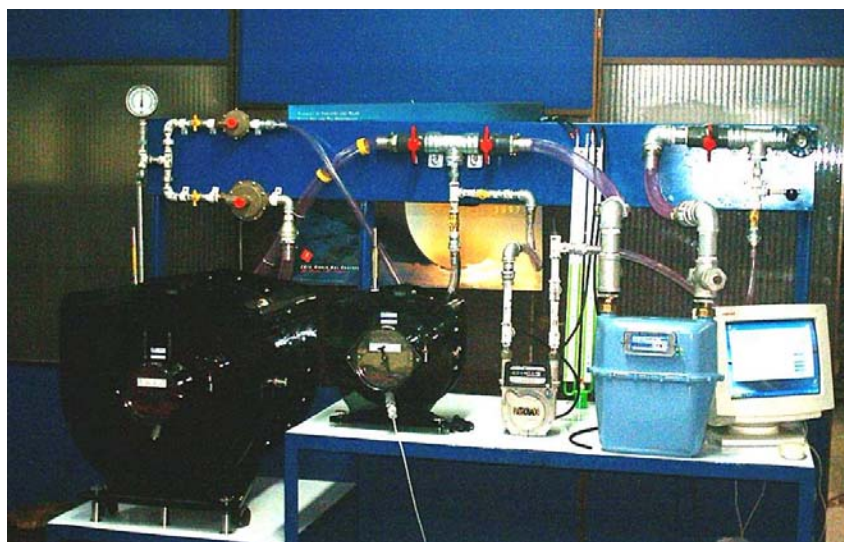
El método de ajuste y puesta a punto de las cámaras es fundamental para obtener resultados confiables, particularmente las tareas de nivelación del cuerpo de la cámara, la nivelación del aceite y el criterio usado para observar el ajuste del líquido son factores que influyen fuertemente sobre el resultado, pudiendo variar de acuerdo con el operario. Por esta razón se requiere implementar procedimientos bien definidos al respecto.

Las cámaras húmedas se comercializan en un amplio intervalo de capacidades, usualmente en un laboratorio se requieren dos patrones para cubrir el alcance de medición de los medidores residenciales que se instalan en Colombia. Por su constitución y naturaleza, son patrones delicados, basados en un principio de funcionamiento netamente mecánico. El

tamaño de una cámara húmeda para calibrar los medidores residenciales de mayor capacidad puede ocupar un volumen de un cubo de 650 mm por cada lado y pesar alrededor de 35 kg sin aceite. Aunque se transportan vacías, es necesario asegurar un correcto embalaje cuando se envían a calibrar, con el fin de que sus elementos mecánicos no sufran esfuerzos durante el transporte.

En la Figura 21 se muestra una instalación típica de calibración de medidores de diafragma basada en dos cámaras húmedas. Las cámaras húmedas se instalan en serie con el medidor o los medidores a calibrar. El intervalo de recalibración de las cámaras puede variar de acuerdo con la frecuencia de uso que se les da a las mismas, usualmente los períodos oscilan entre 1 y 2 años.

Figura 21. Banco de calibración basado en cámaras húmedas



Cortesía: CDT de GAS

Como en todas las instalaciones donde se trabaja midiendo volúmenes de gas, es imprescindible contar con unas excelentes condiciones de estabilidad térmica para obtener baja incertidumbre en las mediciones. El costo de estos patrones puede catalogarse como medio respecto a las demás tecnologías disponibles, no obstante es importante resaltar que en la actualidad, gracias a los esfuerzos de COLCIENCIAS y de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (*CDT de GAS*), este tipo de patrones construye en nuestro país.

2.3. TOBERAS DE FLUJO CRÍTICO (*BOQUILLAS SÓNICAS*)

La medición de caudal de gas con toberas de flujo crítico es un caso especial de la aplicación de elementos de estrangulación. A diferencia de los medidores por presión

diferencial, donde el descenso de la presión a través del elemento de estrangulación sirve para inferir el caudal, las toberas de flujo crítico aceleran el flujo de gas de tal manera que se alcanza la velocidad del sonido en la sección más estrecha de la tobera (*garganta*).

Figura 22. Toberas de flujo crítico



Cortesía: CDT de GAS

Como resultado de esta condición se limita el caudal de forma que las condiciones aguas abajo de la garganta ya no pueden ejercer una influencia sobre las condiciones y el estado del flujo a la entrada de la tobera. Esta es la diferencia principal al comparar esta tecnología con los dispositivos tradicionales de presión diferencial (*P. Ej. placas de orificio*).

Una vez se alcanza la condición de flujo crítico, el caudal es constante de forma que si se mide el tiempo puede obtenerse el valor de masa o volumen de gas que fluye a través de la tobera durante un intervalo específico.

Una tobera de flujo crítico es un elemento de flujo de sección convergente-divergente. En la sección convergente el flujo se acelera gradualmente hasta alcanzar la velocidad local del sonido en la garganta, posteriormente en la sección divergente el flujo se acelera a velocidades supersónicas hasta que se genere un fenómeno conocido como onda de choque, el cual es altamente irreversible. Como resultado de la formación de la onda de choque ocurre una transformación de la energía de velocidad en presión, por este motivo, la relación de presiones que se requiere para lograr bloquear una tobera es del orden de 0,9 aunque este valor depende fuertemente del diámetro de la garganta, del diseño y de la calidad de la construcción.

Generalmente, en la calibración de medidores residenciales en laboratorio, las toberas operan aguas debajo de los medidores a calibrar, los cuales están abiertos a la atmósfera. Para obtener la relación de presiones necesaria para el bloqueo de la tobera, se instala una bomba de vacío aguas abajo de estas, una vez la presión desciende hasta el valor de bloqueo se obtiene la condición de caudal constante. En la Figura 23 se muestra un banco de calibración de medidores residenciales basado en toberas de flujo crítico.

Figura 23. Banco de calibración de medidores residenciales con toberas de flujo crítico



Cortesía: Actaris Metering Systems

Uno solo de los laboratorios acreditados para la calibración de medidores residenciales en Colombia posee un sistema basado en toberas de flujo crítico. Sin embargo, para verificar el desempeño de los medidores en los sectores comercial e industrial, algunas distribuidoras han adquirido juegos de toberas para usar en campo, diseñadas para operar con gas natural a las condiciones de presión de línea aunque estas facilidades no están acreditadas.

Por otra parte, al igual que en las cámaras húmedas, actualmente en nuestro país se diseñan y construyen toberas de flujo crítico como resultado de la ejecución de un proyecto de desarrollo tecnológico auspiciado por COLCIENCIAS y desarrollado por el CDT de GAS con el apoyo del Centro de Metrología de Fluidos del Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Estado de Sao Paulo (CMF-IPT).

Como resultado del proyecto se obtuvo un patrón para calibración de medidores de gas hasta 550 m³/h, con una incertidumbre de medición de 0,4%, el cual se encuentra actualmente en proceso de acreditación (Figura 24).

Figura 24. Banco de calibración de medidores industriales con toberas de flujo crítico



Cortesía: CDT de GAS

Las ventajas de las toberas son diversas, entre ellas vale la pena mencionar las siguientes:

- Se basan en un fenómeno netamente termodinámico, asociado a la mecánica de fluidos a alta velocidad, por lo tanto carecen de mecanismos, partes móviles y fricción
- Como consecuencia de lo anterior, las toberas conservan sus propiedades metrológicas por extensos períodos de tiempo (*usualmente de 5 a 10 años dependiendo del diámetro de la garganta y del gas con que se usen*) [20]
- La incertidumbre de medición es muy baja, siendo en gran proporción atribuida a la calidad de los patrones con los cuales se calibraron, por este motivo se utilizan como patrones de transferencia para la realización de comparaciones entre laboratorios [1]

Por otra parte, los costos asociados a la implementación de esta tecnología son altos en comparación con las demás, estudiados hasta el momento.

2.4. CAMPANA GASOMÉTRICA

Como se presentó en el capítulo anterior, una campana gasométrica es un patrón volumétrico que opera a presión constante (*volumen constante*). Debido a que sus mediciones pueden referenciarse a magnitudes diferentes a volumen o caudal (*longitud, temperatura, presión*) se constituye como un patrón primario, contra el cual se calibran los demás patrones (*P. Ej. cámaras húmedas, toberas de flujo crítico, LFEs*).

En la escala metrológica, las campanas gasométricas son patrones de la más alta jerarquía en cuanto a mediciones de volumen y caudal de gases, por tal motivo son los patrones de referencia en laboratorios nacionales de metrología, con incertidumbres de medición del

orden de 0,1 a 0,2%, su uso está destinado a brindar trazabilidad a través de la calibración de los demás patrones.

Figura 25. Calibración con patrón primario tipo campana gasométrica



Cortesía: CDT de GAS

Por lo anterior, resulta conveniente analizar que aplicar un patrón de tan elevado desempeño a la calibración de medidores de gas residenciales es una manera “*sobredimensionada*” en términos metrológicos de verificar elementos de medición sobre los cuales se espera que el error oscile en un intervalo con un ancho del orden de 3% o 4% dependiendo si es un medidor nuevo o usado.

Aunque hay modelos de campanas gasométricas comercialmente disponibles como una opción para la calibración de medidores de gas residenciales, generalmente se implementan en empresas fabricantes de medidores para verificar que sus productos cumplen con las especificaciones de metrología legal aplicables.

En Colombia uno solo de los laboratorios de calibración acreditados cuenta con un patrón primario de este tipo, aunque su uso primordial se enfoca hacia la calibración de cámaras húmedas, toberas y medidores secos, también se emplea para la calibración de medidores de gas tipo residencial. Para una mayor ilustración acerca del diseño, construcción y operación de estos patrones puede consultarse [22].

El costo de un patrón de estas características, destinado a la calibración en serie de medidores de gas es superior al de un banco con toberas de flujo crítico, por lo tanto, podría decirse que su costo puede ser muy alto en términos relativos. Además de la baja incertidumbre de medición, otras ventajas de las campanas gasométricas pueden ser:

- Mantienen sus características metrológicas por largos períodos de tiempo
- Se calibran por medios dimensionales (*strapping*)
- Requieren relativamente poco mantenimiento
- Son fáciles de automatizar debido a su operación simple

Las campanas gasométricas se comercializan de acuerdo con la capacidad de gas que pueden acumular en su interior. Para la verificación de medidores de gas residenciales se emplean comúnmente campanas de 100 y 200 dm³ de capacidad.

2.5. OTROS MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

También resulta común encontrar métodos de calibración basados en el uso de medidores de diafragma tipo residencial como patrón de referencia. Estos medidores (*calibrados previamente contra un patrón reconocido*), se instalan en serie con el medidor a verificar, comparándose sus indicaciones y obteniendo de esta forma el error de medición.

Retomando el patrón tipo medidor seco, con una resolución superior a la de los medidores residenciales, donde la incertidumbre asociada a la medición era mayor o en el mejor de los casos igual a 1%, resulta lógico imaginar que la utilización de un patrón con una resolución igual a la del medidor a calibrar y de las mismas características metrológicas (*medidor gemelo*) no es una buena práctica metrológica, especialmente para la toma de decisiones sobre la aceptación o el rechazo de un diafragma conforme las especificaciones que debe cumplir.

Una particularidad adicional, interesante para traer a colación, es el método de calibración basado en orificios calibrados que operan con aire a velocidad subsónica, similar a una placa de orificio. Este método está difundido principalmente entre las distribuidoras de gas pequeñas y no es usado por ninguno de los laboratorios acreditados actualmente.

En este método, extremadamente económico, se usa un orificio concéntrico, instalado al interior de una tubería, usualmente de PVC. Sobre la tubería se disponen un par de tomas de presión, con el objeto de reproducir una presión diferencial equivalente a un caudal específico, el cual se ha evaluado previamente en un laboratorio.

La dificultad para reproducir fielmente las condiciones de presión y temperatura absolutas, las cuales afectan directamente la densidad y por ende el volumen, es uno de los problemas asociados a éste método. Realizando un análisis sencillo del caso, mediante la comparación contra un sistema de transferencia de custodia de gas natural basado en placa de orificio,

donde la incertidumbre de medición es del orden de 1% para un sistema diseñado, construido y operado con las mejores tecnologías, es claro que en el caso específico del orificio calibrado no se podrá lograr el mismo nivel de incertidumbre y por lo tanto no será una prueba válida y contundente al instante de evaluar el desempeño de un medidor.

Para finalizar, también se han encontrado otros métodos “*alternativos*” de calibración, tales como el aprovechamiento de los quemadores de un artefacto gasodoméstico (*P. Ej. equipo de cocción o calentador*) puesto en operación durante la inspección a las instalaciones internas, para verificar que el volumen registrado por el medidor corresponda a “*aproximadamente*” el asociado al consumo del gasodoméstico en cuestión, quedando de esta forma validada la indicación del medidor.

2.6. RESUMEN DE SISTEMAS DE CALIBRACIÓN

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los sistemas de calibración aplicables a la verificación metrológica de medidores de gas residenciales, cada uno con su respectivo nivel de incertidumbre asociado.

En la Tabla 5 se presenta un listado de los laboratorios de calibración acreditados en Colombia por la SIC para la calibración de medidores de gas.

Tabla 4. Resumen de tecnologías de calibración

Tecnología	Incertidumbre asociada
Medidor seco	$\geq 1\%$
Cámara húmeda	0,5%
Toberas de flujo crítico	0,2 a 0,4%
Campana gasométrica	0,1 a 0,2%
Diafragma	$\geq 2\%$
Orificios calibrados	$\geq 5\%$
Gasodoméstico	$\geq 15\%$

Tabla 5. Laboratorios acreditados para calibración de medidores de gas residenciales

Laboratorio	Ubicación	Patrones	Alcance de medición	Incertidumbre declarada*
Gas Natural S.A. E.S.P.	Bogotá	2 Cámaras húmedas	16 a 6 000 dm ³ /h	0,65%
Surtigas S.A. E.S.P.	Cartagena	3 Cámaras húmedas	16 a 6 000 dm ³ /h	0,57%
Empresas Públicas de Medellín E.S.P.	Medellín	6 Toberas 3 cámaras húmedas	16 a 10 000 dm ³ /h	0,26 a 0,52%
Gases del Caribe S.A. E.S.P.	Barranquilla	2 Cámaras húmedas	16 a 2 500 dm ³ /h	0,27%
CDT de GAS	Piedecuesta	Campana gasométrica	16 a 25 000 dm ³ /h	0,10 a 0,22%

* Corresponde a la mejor capacidad de medición

CAPÍTULO III

3. INGENIERÍA BÁSICA Y CONCEPTUAL

3.1. REQUISITOS LEGALES

El patrón se orientará hacia la calibración y verificación metrológica de medidores de gas residenciales de tipo diafragma (*desplazamiento positivo*). En Colombia, la Resolución CREG 067 de 1995, conocida como “*Código de Distribución de Gas Combustible por Redes*”, especifica los siguientes requisitos aplicables a los equipos de medición:

- **Numeral 5.27:** “*Los equipos de medición deberán cumplir con las Normas Técnicas Colombianas o las homologadas por la Superintendencia de Industria y Comercio, de tal forma que permitan una determinación de la cantidad de gas entregada y una verificación de la exactitud de medición*”.
- **Numeral 5.29:** “*La exactitud de los equipos de medición será verificada por el distribuidor o el comercializador a intervalos razonables y como máximo cada cinco años, y, de ser solicitado, en presencia de representantes del usuario. En caso de que el usuario solicite una comprobación especial de cualquier equipo, las partes cooperarán para garantizar una inmediata verificación de la exactitud de tal equipo. El gasto de tales comprobaciones especiales correrá por cuenta del usuario. La calibración de los medidores la realizará el distribuidor en sus propios laboratorios, o podrá contratarla con firmas debidamente autorizadas por la Superintendencia de Industria y Comercio*”.
- **Numeral 5.30:** “*Si, al efectuarse la comprobación, se encontrare que cualquier medidor o equipo de medición fuera inexacto en un dos por ciento (2%) o más, por exceso o por defecto, el equipo será ajustado para el volumen de gas entregado y calibrado. El distribuidor o el comercializador y el usuario podrán acordar que el medidor será calibrado cuando presente un margen de error menor al aquí establecido, o se podrá hacer un ajuste en la facturación mediante la utilización de factores de corrección hasta que se efectúe la calibración*”.
- **Numeral 5.31:** “*La cantidad de gas registrada por el medidor sujeta a las correcciones aplicables por presión, temperatura, calidad del gas, y del medidor, será definitiva y concluyente para los efectos de facturación. Se tomarán los valores oficiales de temperatura y altura*”.

3.2. REQUISITOS TÉCNICOS

3.2.1. Normatividad

Considerando que en el Código de Distribución se establece que los equipos de medición deben cumplir con las Normas Técnicas Colombianas (NTC) o aquellas homologadas por la Superintendencia de Industria y Comercio, se realizó la consulta de normativa aplicable con el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), obteniéndose los siguientes resultados:

- Norma Técnica Colombiana NTC 2728 (2005-06-29) “Medidores de Gas Tipo Diafragma”⁵
- Norma Técnica Colombiana NTC 2826 (1990-12-05) “Aparatos Mecánicos. Dispositivos Generales para Medidores de Volumen de Gas”⁶

3.2.2. Análisis de la normatividad

Los anteriores documentos técnicos fueron analizados con el objetivo de obtener los aspectos técnicos relevantes a las condiciones metrológicas que deben cumplir los medidores de gas en cuanto a su desempeño y aquellas que debe cumplir una instalación destinada a calibrar y/o verificar metrológicamente los medidores. En la Tabla 6 se presenta el resumen del estudio, anexando la referencia, el numeral respectivo y el requisito estipulado.

Tabla 6. Resumen de requisitos metrológicos estipulados en documentos técnicos

Referencia	Requisito
NTC 2728	5.1. El fluido de calibración es aire de densidad $1,2 \text{ kg/m}^3$.
NTC 2728	5.1. Errores máximos permisibles para aprobación de modelo y verificación inicial de medidores: Para $Q_{\min} \leq Q \leq 0,1Q_{\max}$: $\pm 3\%$ Para $0,1Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$: $\pm 1,5\%$
NTC 2728	5.1. Errores máximos permisibles para medidores en servicio: Para $Q_{\min} \leq Q \leq 0,1Q_{\max}$: -6% , $+3\%$ Para $0,1Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$: $\pm 3\%$
NTC 2728	6. La pérdida total de presión para aprobación de modelo y verificación inicial de medidores con Q_{\max} entre 1 y $10 \text{ m}^3/\text{h}$ (<i>inclusive</i>) operando a Q_{\max} : Aprobación de modelo y verificación inicial: 200 Pa

⁵ Correspondencia: Esta norma es una adopción modificada por redacción de la recomendación OIML R31:1995

⁶ Documento de Referencia: OIML R6:1989

Referencia	Requisito
	Medidores en servicio: 220 Pa
NTC 2728	8.2. Se considera que un medidor de gas cumple con los requisitos relacionados con los errores máximos permisibles, si éstos se cumplen para los siguientes caudales: Q_{\min} , $0,2Q_{\max}$ y Q_{\max} .
NTC 2728	B.1.2.1. La temperatura ambiente promedio se define como la media aritmética de las siguientes temperaturas: <ul style="list-style-type: none"> ▪ temperatura ambiente aproximada del (los) patrón (es) de referencia; ▪ temperatura ambiente aproximada de los medidores que se van a ensayar; ▪ temperatura del aire en la entrada de aire a la instalación de ensayo; ▪ temperatura ambiente cerca del sitio en la sala de ensayo en donde los medidores que se van a ensayar se encuentran almacenados antes del examen.
NTC 2728	B.1.2.2. Las condiciones del aire en la sala de ensayo deben ser suficientemente estables. Esto exige mínimo que: <ul style="list-style-type: none"> ▪ la temperatura ambiente promedio no varíe más de 4°C para 12 h ni más de 2°C para cada hora. ▪ la diferencia entre dos temperaturas cualesquiera, mencionadas en el numeral B.1.2.1, no exceda 2°C.
NTC 2728	B.1.2.3. Si se cumplen los siguientes requisitos, los medidores se pueden ensayar sin aplicar corrección para las diferencias de temperatura entre el medidor de referencia y el medidor que se va a ensayar: <ul style="list-style-type: none"> ▪ el aire usado para ensayar los medidores se halla en condiciones ambientales; ▪ la temperatura ambiente promedio no varía más de 2°C para 12 h ni más de 0,5°C en cada hora; ▪ la diferencia entre dos temperaturas cualesquiera, mencionadas en el numeral B.1.2.1, no exceda 0,5°C.
NTC 2728	B.1.2.5. Durante las mediciones, la temperatura en la sala de ensayo se debe verificar mínimo una vez por hora.
NTC 2728	B.1.2.6. Es conveniente medir la presión barométrica en el laboratorio mínimo una vez al día.
NTC 2728	B.1.3.1.1. El aire de ensayo debe estar limpio y libre de polvo y aceite.
NTC 2728	B.1.3.1.2. La temperatura del aire de ensayo debe estar 0,5 °C cerca de la temperatura ambiente promedio.
NTC 2728	B.1.3.1.3. La humedad relativa debe ser tal que se evite la condensación en todo momento.
NTC 2728	B.1.3.2.4. El dispositivo de medición de la presión, usado para controlar la pérdida promedio de presión del medidor sometido al ensayo, debe permitir promediar las variaciones normales en la presión del medidor.
NTC 2728	B.1.3.3. La temperatura representativa del volumen de gas medido se debe medir en la salida del medidor bajo ensayo.
NTC 2728	B.1.3.4. La tasa de fugas debe ser inferior al mayor de los siguientes

Referencia	Requisito
	valores: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,1% del caudal mínimo para el cual está prevista la instalación; ▪ 100 cm³/h.
NTC 2728	B.1.3.5. Si los medidores se van a ensayar en serie, no debería haber interacción entre los mismos. Esta condición se puede verificar ensayando cada medidor de la serie una vez en cada posición de la línea.
NTC 2728	B.1.4.1. La instalación de ensayo debe estar equipada con patrones de referencia que sean adecuados para el ensayo de medidores de gas tipo diafragma. El rango de medida de los patrones de referencia debe ser compatible con el de los medidores que se van a ensayar.
NTC 2728	B.1.4.2. Los manómetros, termómetros y patrones de referencia de volumen empleados para medir los parámetros que entran en el cálculo de toda cantidad relacionada con la aprobación de modelo o con la verificación inicial, deben tener certificados de calibración trazables a patrones nacionales o internacionales.
NTC 2728	B.1.4.3. Los certificados mencionados en el numeral B.1.4.2 deben cubrir los alcances para los cuales se usan los instrumentos y deben informar la incertidumbre de calibración.
NTC 2728	B.1.4.4. El laboratorio debe, en todo momento, poder especificar incertidumbres de tipo A y de tipo B en la determinación del error del medidor. Las incertidumbres se deben calcular de acuerdo con el documento “ <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> ” edición de 1993, y se debe calcular la incertidumbre global (<i>expandida</i>) con un factor de cubrimiento de k=2.
NTC 2728	B.1.4.5. La incertidumbre global en la determinación de los errores del medidor debe ser inferior por lo menos en un tercio de los valores de los errores máximos permisibles para los medidores ensayados. Para las instalaciones de ensayo usadas para la aprobación de modelo, el mismo factor debe ser como mínimo un quinto.
NTC 2826	T.12. Error (<i>de indicación</i>): Indicación de un medidor de gas menos el valor verdadero (<i>convencional</i>) del mensurando (<i>VIM 5.24</i>). Nota: Los errores (<i>E</i>) se expresan en términos relativos mediante la relación (<i>expresada como un porcentaje</i>) de la diferencia entre el valor indicado (<i>V_i</i>) y el valor convencionalmente verdadero (<i>V_c</i>) del volumen del medio de ensayo que ha pasado por el medidor de gas y el valor de éste último: $E(\%) = 100 \frac{V_i - V_c}{V_c}$

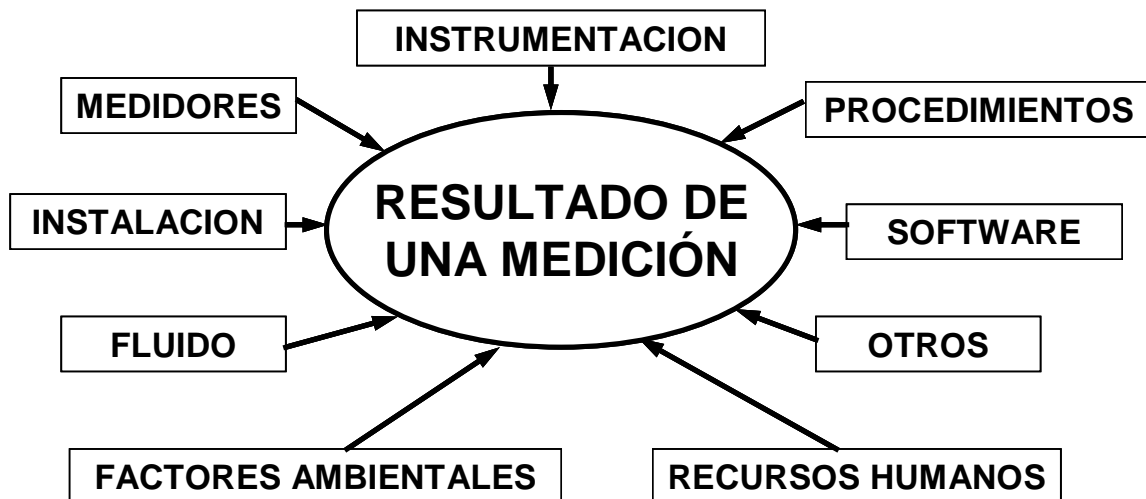
3.2.3. Consideraciones de diseño

Al momento de diseñar una instalación para calibración de medidores se deben tener en cuenta varios factores con el fin de garantizar la confiabilidad en los resultados sintetizada en una baja incertidumbre de medición.

De forma general, debe considerarse la interacción de los elementos que intervienen en el resultado de la medición, con el objetivo de generar acciones encaminadas hacia su control y hacia la reducción de las influencias perjudiciales sobre la incertidumbre de medición.

En la Figura 26 se presenta esquemáticamente la influencia de diversos factores sobre el resultado de una medición en un laboratorio de calibración.

Figura 26. Factores que influyen la medición



3.3. CARACTERÍSTICAS DEL PATRÓN

En Colombia, en materia de medición de consumos de gas a nivel residencial, se utilizan medidores de diferentes marcas y orígenes, sin embargo, las capacidades de los mismos están del orden de 2,5 a 6 m³/h (FS). En la Tabla 7 se presentan las designaciones de los medidores usados en Colombia según la OIML, con su respectivo alcance de medición.

Considerando las tolerancias expresadas en las normas para los errores máximos permisibles y que el patrón debe poseer cualidades metrológicas por lo menos 3 veces mejores a dichos errores, el primer paso consiste en determinar las características que debe cumplir el patrón para cumplir dicho requisito. Para este propósito es de gran ayuda una representación gráfica de las exigencias en cuanto a los medidores y a la instalación de ensayo de los mismos.

Tabla 7. Alcance de medición de los medidores residenciales usados en Colombia

Designación OIML	$Q_{\text{máx}}$	Límite superior de $Q_{\text{mín}}$
G 1.6	2,5 m ³ /h	0,016 m ³ /h
G 2.5	4 m ³ /h	0,025 m ³ /h
G 4	6 m ³ /h	0,040 m ³ /h

En la Figura 27 a la Figura 29 se presenta dicho análisis, aplicado al alcance de medición de los tres medidores usados para distribución de gas residencial en Colombia.

Figura 27. Errores máximos permisibles medidor G 1.6

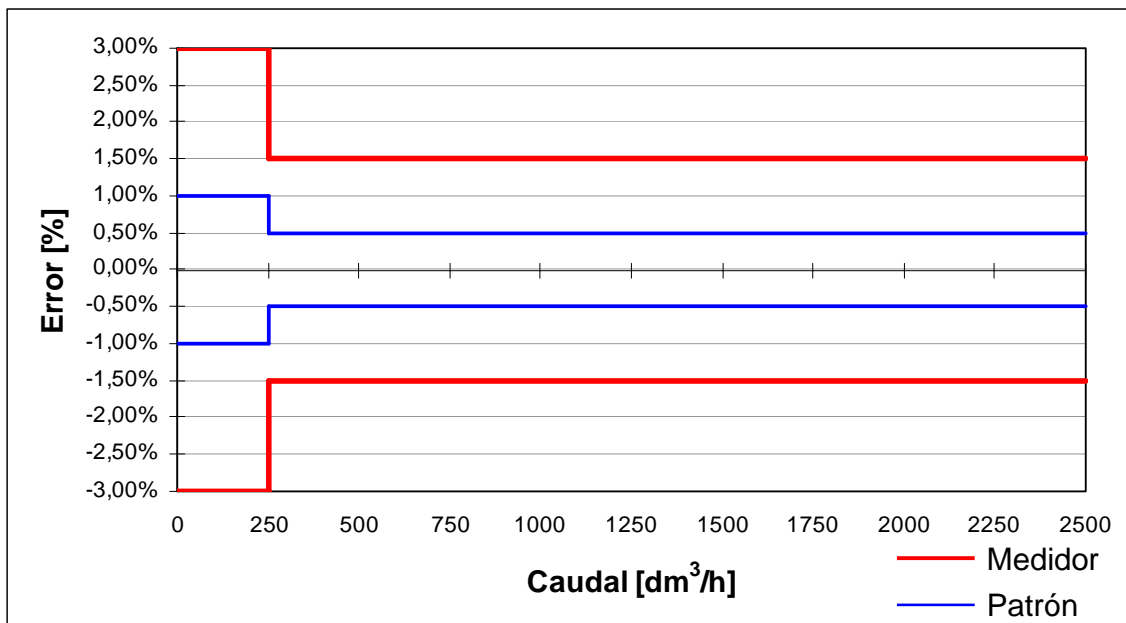


Figura 28. Errores máximos permisibles medidor G 2.5

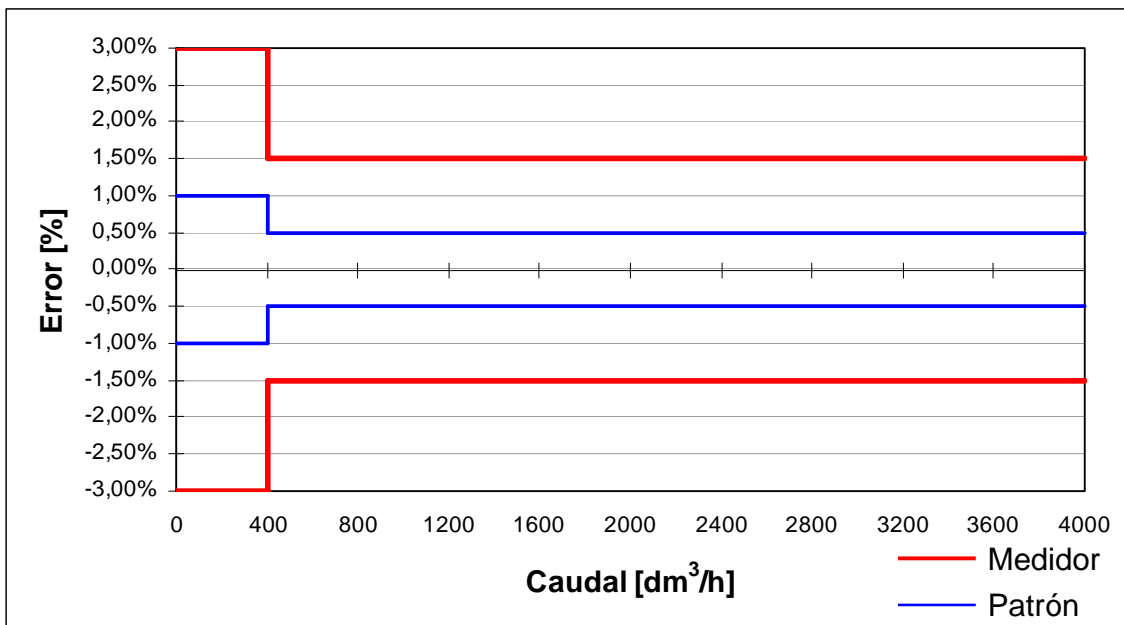
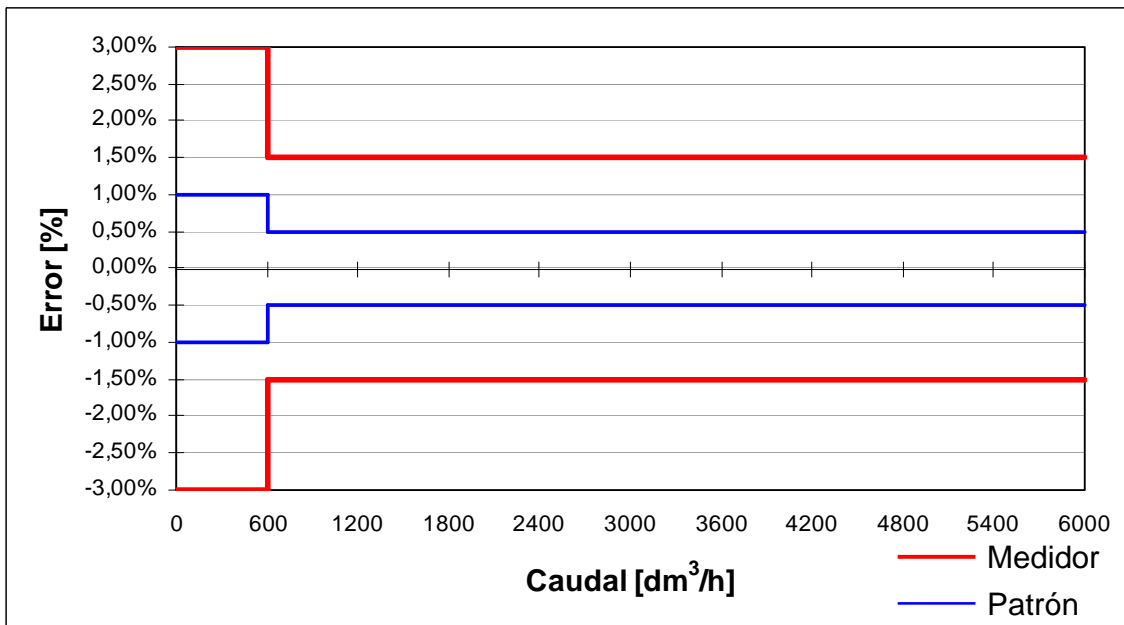


Figura 29. Errores máximos permisibles medidor G 4



En las figuras anteriores, la línea roja representa los límites del error máximo permisible para cada designación de medidor, por otra parte, la línea azul representa la tolerancia equivalente a la tercera parte del error máximo permisible; como lo exige la NTC 2728 para

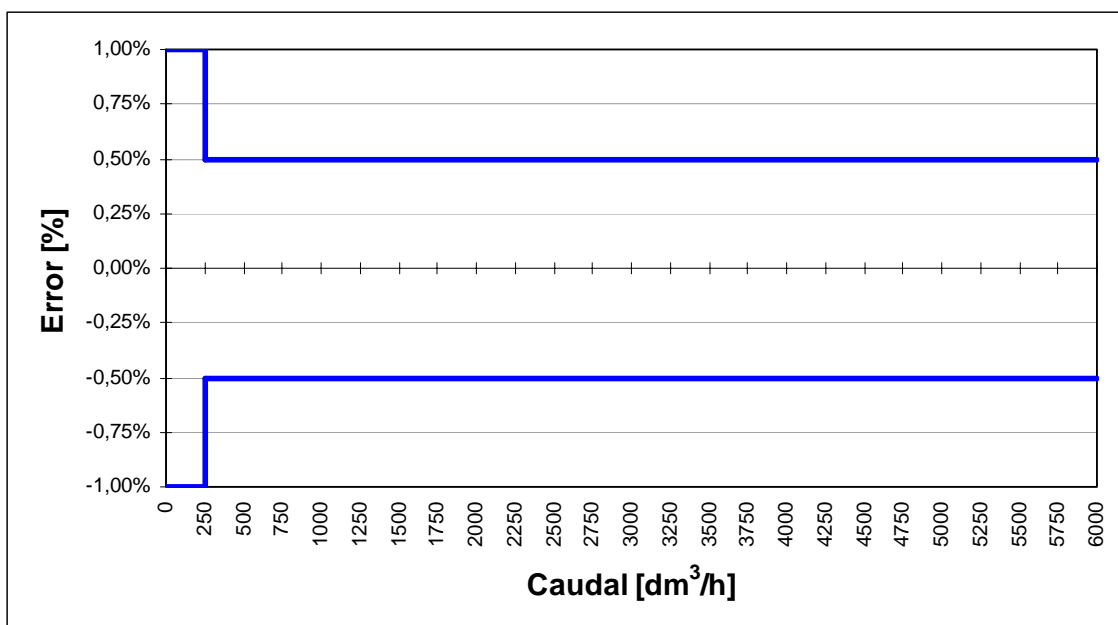
los sistemas de calibración orientados hacia la verificación inicial de medidores de diafragma. No se consideraron los requisitos para medidores en servicio (*verificación posterior*) debido a que sus límites de aceptación son más amplios y en esta medida, menos estrictos. En resumen, en la Tabla 8 se presentan los parámetros críticos que debe atender el patrón de medición, con el propósito de cumplir los requisitos de la norma.

Tabla 8. Parámetros críticos para el patrón de medición

Parámetro	Valor de la magnitud	Incertidumbre de medición
Caudal mínimo	0,016 m ³ /h (16 dm ³ /h)	≤ 1,0 % (<i>k</i> =2)
Caudal máximo	6 m ³ /h (6000 dm ³ /h)	≤ 0,5 % (<i>k</i> =2)
Caudal mínimo de transición (0,1Q _{máx})	0,25 m ³ /h (250 dm ³ /h)	≤ 0,5 % (<i>k</i> =2)
Caudal máximo de transición (0,1Q _{máx})	0,6 m ³ /h (600 dm ³ /h)	≤ 0,5 % (<i>k</i> =2)

De acuerdo con la Tabla 8, el patrón debe garantizar que la incertidumbre de medición asociada a caudales desde 16 dm³/h hasta un valor límite de 250 dm³/h sea de por lo menos 1,0% (*k*=2), por otra parte, para caudales desde 250 dm³/h hasta 6000 dm³/h debe ser de por lo menos 0,5%. De acuerdo con el anterior análisis, en la Figura 30 se presenta una gráfica con los límites que debe cumplir el patrón de medición.

Figura 30. Límites de incertidumbre del patrón de medición



3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA

3.4.1. Presión

Aunque en la normatividad no se dan detalles específicos de la calidad que deben tener los instrumentos para medir presión, asociados tanto al patrón como al medidor objeto de calibración, se tienen las siguientes consideraciones:

- Con base en la investigación realizada sobre los LFEs y la información técnica disponible, es claro que un medidor basado en la tecnología de flujo laminar debe contar con una medición de presión absoluta y diferencial con muy baja incertidumbre de medición, especialmente si se piensa aprovechar sus características en la calibración de medidores. Por lo tanto, se requeriría de una Clase mejor a 0,1% (FS) para cumplir los requisitos.
- Teniendo en cuenta que la medición de presión asociada al medidor objeto de calibración se requiere fundamentalmente para dos cosas: 1) determinar su caída de presión, verificando que cumple el requisito de la norma), y 2) para establecer la presión absoluta a la cual se está midiendo efectivamente el gas en el medidor; es posible utilizar un manómetro con una Clase de hasta 2% (FS) sin influir significativamente sobre la incertidumbre de medición.

En la Tabla 9 se resumen los requisitos asociados a los instrumentos para medición de presión.

Tabla 9. Requisitos asociados a los instrumentos de presión

Parámetro	Incertidumbre de medición
Presión absoluta del EFL	$\leq 0,1\% \text{ FS}$
Presión diferencial del EFL	$\leq 0,1\% \text{ FS}$
Presión diferencial del medidor	$\leq 2\% \text{ FS}$

3.4.2. Temperatura

De la misma forma que en la medición de presión, la normatividad no es clara en cuanto a la calidad de los instrumentos de temperatura. Analizando lo expresado en las normas, se tienen las siguientes consideraciones:

- Para el cálculo de la viscosidad es muy importante contar con un excelente instrumento de medición de temperatura a las condiciones del flujo. Por lo tanto, se requeriría de un conjunto sensor/transmisor de temperatura con una incertidumbre de medición menor o igual a 0,15°C para cumplir los requisitos.

- La medición de temperatura a la cual se está midiendo efectivamente el gas en el medidor es importante para verificar la estabilidad térmica y para aplicar correcciones al volumen, especialmente en caso de que no se cumplan los requisitos de estabilidad previstos en la norma. Un elemento indicador de temperatura con una incertidumbre de medición inferior o igual a 0,2°C es suficiente para este propósito.

En la Tabla 10 se resumen los requisitos asociados a los instrumentos para medición de temperatura.

Tabla 10. Requisitos asociados a los instrumentos de temperatura

Parámetro	Incertidumbre de medición
Temperatura del EFL	$\leq 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura del medidor	$\leq 0,20 \text{ }^\circ\text{C}$

3.4.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales a las cuales se realiza la calibración son importantes por diferentes propósitos. En primera instancia, si se carece de transductores de presión absoluta, debe utilizarse la presión atmosférica para calcular la absoluta a partir de las indicaciones manométricas; por otra parte, la temperatura ambiente en el local de calibraciones y su correspondiente control son requisitos para asegurar la confiabilidad en las mediciones y garantizar una estabilidad que brinde baja incertidumbre de medición, por esta razón es importante registrar su evolución a través del tiempo; por último, la humedad relativa del aire ambiente, es importante para asegurar que se controla dentro de un nivel suficiente para garantizar que no condensará sobre los equipos e instrumentos de medición.

Considerando lo anterior, es importante que además de conseguir una indicación confiable de las magnitudes, se debe tener un registro continuo de las mismas. Para este propósito se puede implementar un dispositivo integrado de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa.

Las tolerancias para la incertidumbre de medición de cada magnitud se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Requisitos asociados a la medición de condiciones ambientales

Parámetro	Valor de la magnitud	Incertidumbre de medición
Presión atmosférica	De acuerdo con la altitud	≤ 50 Pa
Temperatura ambiente	15 a 25 °C	$\leq 0,5$ °C
Humedad relativa	40 a 60 %	$\leq 5\%$

3.5. CARACTERÍSTICAS DEL LOCAL DE CALIBRACIONES

Para cumplir las exigencias de temperatura y humedad establecidas en las normas técnicas, es necesario implementar un sistema de aire acondicionado con una capacidad suficiente para lograr la estabilidad térmica en relación a la carga que se espera contenga el local de calibraciones.

En ambientes con alta humedad relativa es posible que se requiera instalar unidades para remoción de humedad, sin embargo, un sistema de aire acondicionado central dotado de una buena medición y correspondiente control de las propiedades psicrométricas (*temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo, humedad relativa*) es suficiente para conseguir el objetivo.

El local debería estar libre de ventanas por donde pueda haber entrada de radiación solar y preferiblemente debe ubicarse en un sitio propicio para una buena estabilidad térmica, considerando el movimiento relativo del sol respecto a la orientación del local y la disposición de los equipos en su interior. Aspectos como la presencia de ruido y vibración deben considerarse al instante de seleccionar el área para el laboratorio, al igual que el control de acceso de personal al mismo.

Idealmente, las condiciones del local de calibraciones deben ser las expresadas en la Tabla 12.

Tabla 12. Condiciones del local de calibraciones

Condición	Valor	Estabilidad
Temperatura ambiente	20 ± 2 °C	2 °C / 12 horas 0,5 °C / hora
Humedad relativa	$50 \pm 10\%$	5% / hora

3.6. CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE ENSAYOS

El fluido a usar como medio de calibración debe ser aire, el cual puede tomarse del mismo ambiente del local de calibraciones u obtenerse a partir de una red de aire comprimido.

Considerando los requisitos de incertidumbre impuestos por la normativa técnica, resulta más conveniente para la operación de los LFEs, el uso de aire tomado de una red de aire comprimido, teniendo la previsión de remover las partículas en suspensión, vapor de agua y aceite que puedan transportarse a través de las tuberías. Para tal propósito pueden usarse filtros o inclusive instalar una unidad de secado, bien sea mediante un arreglo de haces de tubos o a través de un deshumidificador.

3.7. INGENIERÍA BÁSICA Y CONCEPTUAL

3.7.1. Selección del patrón

Para la selección del patrón se estudiaron diferentes alternativas ofrecidas por media docena de fabricantes de LFEs. La evaluación de cada proveedor de tecnologías se basó exclusivamente en la calidad del producto, de acuerdo con las especificaciones ofrecidas y teniendo en cuenta el reconocimiento de los fabricantes como suministradores de tecnologías aptas para uso como patrones de medición, para este propósito la base fue la información disponible de estudios realizados en laboratorios a nivel internacional. Es importante resaltar que para el proceso de selección no se tuvo en cuenta el precio, tan solo la calidad metrológica, de forma que se seleccionó el patrón de mejores características disponibles en el mercado actual, independiente del valor que tenga comercialmente.

El alcance de medición asociado a los medidores G1.6 a G4 equivale a una relación mínimo/máximo de 1:375, por lo tanto, para obtener un nivel de incertidumbre dentro de los límites exigidos por las normas técnicas (*Tabla 8*) se requiere el uso de dos patrones si se considera que los LFEs de mayor desempeño metrológico (*aquellos destinados a uso como patrones*) poseen un alcance mínimo/máximo de 1:100.

De esta forma se seleccionan dos LFEs para dividir entre ambos el alcance de medición, uno para atender los altos caudales y otro para medir con gran exactitud los bajos caudales. El alcance máximo del LFE mayor se selecciona para el caudal máximo de operación y el alcance mínimo del LFE menor para el caudal mínimo de operación.

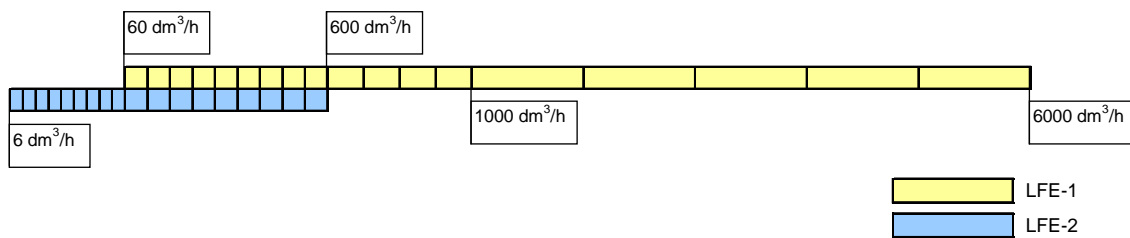
Los LFEs seleccionados, son de alto desempeño metrológico, los diseños de este tipo que se comercializan actualmente se basan en el diseño presentado en la Figura 11-D, donde un pasaje de flujo anular genera una elevada presión diferencial, dotando de esta forma al LFE de una sensibilidad superior; en la *Tabla 13* se presenta el alcance de medición de los LFEs:

Tabla 13. Alcance de medición de los LFEs patrón seleccionados

Identificación	Caudal mínimo [dm ³ /h]	Caudal máximo [dm ³ /h]
LFE-1	60	6000
LFE-2	6	600

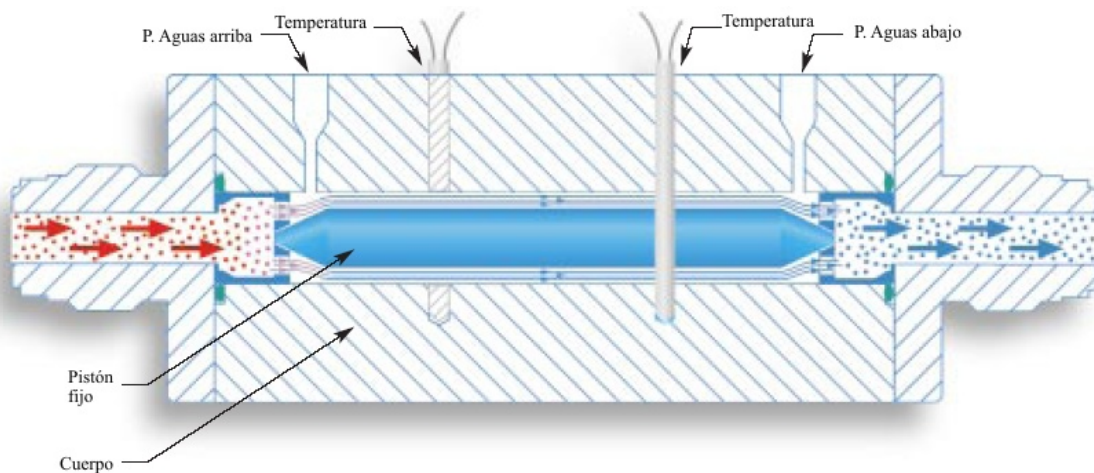
En la Figura 31 se presentan graficados los alcances de medición para los LFEs seleccionados, puede observarse de igual forma, el traslape que existe entre ambos patrones, los cuales en conjunto ofrecen una relación mínimo/máximo de 1:1000.

Figura 31. Alcance de medición de los LFEs patrón seleccionados



Debido a que los LFEs seleccionados se orientan a su uso como patrones de medición, poseen un diseño especial, que inclusive integra el sensor de temperatura internamente en su cuerpo.

Figura 32. Corte transversal de los LFEs patrón seleccionados



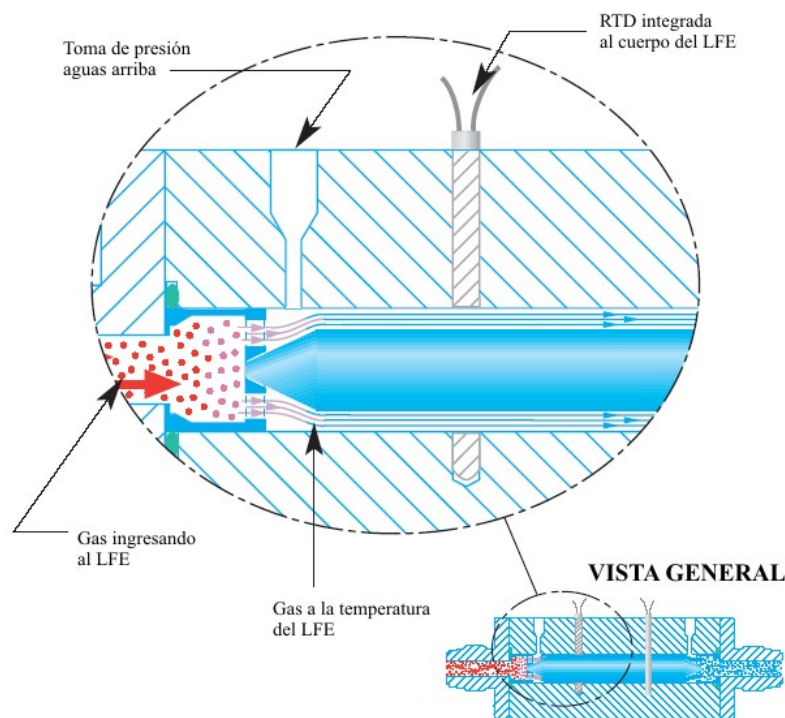
Cortesía: DH Instruments Inc.

Como se estudió en el Capítulo I, por tratarse de una tecnología de medición basada en presión diferencial, el desempeño metrológico de los LFEs dependerá enormemente de esta

variable. Adicionalmente, las correlaciones empleadas para el cálculo de propiedades, especialmente de la viscosidad, juegan un papel decisivo al instante de estimar la incertidumbre de medición asociada al patrón. Debido a que la viscosidad se calcula a partir de la naturaleza del gas a las condiciones de temperatura y presión, es fundamental una medición confiable de estas variables.

En los LFEs seleccionados, la presión aguas arriba y aguas abajo se miden en unas cámaras de estabilización de presión, mediante dos transductores de presión absoluta localizados en una consola. Las lecturas de los transductores aguas arriba y aguas abajo se promedian para determinar la presión absoluta del gas. La diferencia entre las dos lecturas suministra el valor de la presión diferencial a través del LFE. Por medio de válvulas localizadas al interior de la consola y de una función de “ceraje”, se asegura que la medición de presión diferencial proveniente de los dos transductores esté libre de error de ceros en forma permanente e independientemente de las condiciones del flujo.

Figura 33. Detalle transversal de los LFEs patrón seleccionados



Cortesía: DH Instruments Inc.

El diseño también tiene en cuenta particularidades especiales para la determinación de la temperatura del gas fluyendo a través del LFE. En lugar de medir la temperatura del gas a la entrada o a la salida del LFE, la temperatura se mide sobre el cuerpo del medidor, de forma que la masa del LFE y la superficie de contacto con el gas, creada por el sector anular a través del cual fluye éste, ocasionan que el gas intercambie calor, acercándose aún

más a la temperatura del LFE. Al fluir a través del LFE ocurre una expansión isotérmica, cuya temperatura se obtiene midiendo la temperatura del cuerpo del LFE mediante dos termómetros de resistencia de platino (*RTD*) inmersos en forma simétrica dentro del cuerpo. La señal de las *RTDs* se recibe en la consola, obteniéndose la temperatura con una incertidumbre de medición muy baja.

El sistema de medición de temperatura se auto-evalúa mediante de unas resistencias de referencia localizadas al interior de la consola, pudiendo asegurar de esta forma la temperatura dentro de una incertidumbre de $0,1^{\circ}\text{C}$.

La consola que toma las señales de presión y temperatura incorpora adicionalmente un sofisticado sistema de modelamiento matemático y de procesamiento de señales, basado en una serie de algoritmos para obtención de las propiedades del fluido a las condiciones del flujo con gran exactitud. Las características reportadas por el fabricante para los LFEs seleccionados, operando en conjunto con la consola que incorpora los transductores y el sistema de conversión de temperatura para las *RTD* se presentan en la Tabla 14.

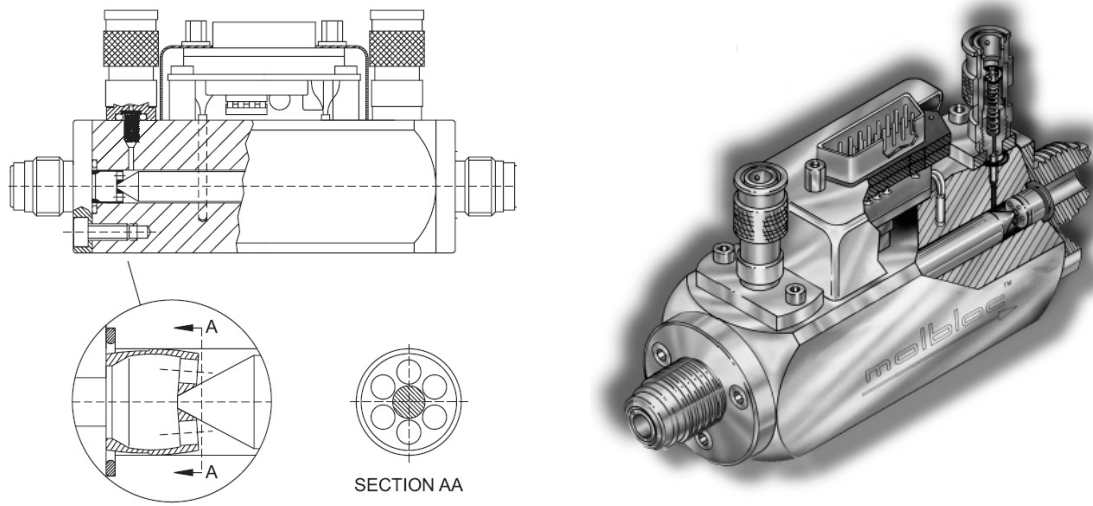
Tabla 14. Características metroológicas del sistema de medición patrón

Característica	LFE-1	LFE-2
Alcance de medición	0 a 6000 dm ³ /h	0 a 600 dm ³ /h
Tasa de muestreo	1 s	1 s
Resolución	0,01% (<i>FS</i>)	0,01% (<i>FS</i>)
Linealidad	$\pm 0,4\%$ de la lectura de 5 a 100% (<i>FS</i>) $\pm 0,02\%$ FS por debajo de 5% (<i>FS</i>)	$\pm 0,23\%$ de la lectura de 1 a 100% (<i>FS</i>)
Repetibilidad	$\pm 0,2\%$ de la lectura de 5 a 100% (<i>FS</i>) $\pm 0,01\%$ FS por debajo de 5% (<i>FS</i>)	$\pm 0,2\%$ de la lectura de 1 a 100% (<i>FS</i>)
Linealidad + Repetibilidad + Histéresis	$\pm 0,45\%$ de la lectura de 5 a 100% (<i>FS</i>) $\pm 0,025\%$ FS por debajo de 5% (<i>FS</i>)	$\pm 0,25\%$ de la lectura de 1 a 100% (<i>FS</i>)
Estabilidad predecida (1 año)	$\pm 0,2\%$ de la lectura de 5 a 100% (<i>FS</i>) $\pm 0,01\%$ FS por debajo de 5% (<i>FS</i>)	$\pm 0,15\%$ de la lectura de 1 a 100% (<i>FS</i>)
Incertidumbre	$\pm 0,5\%$ de la lectura de 5 a 100% (<i>FS</i>) $\pm 0,025\%$ FS por debajo de 5% (<i>FS</i>)	$\pm 0,5\%$ de la lectura de 1 a 100% (<i>FS</i>)

El pasaje de flujo interno corresponde al espacio anular entre el cuerpo del LFE y el pistón interior. Este pasaje está construido únicamente por dos piezas están de acero inoxidable. En el LFE de mayor tamaño, el pistón está sostenido rígidamente en el cilindro del cuerpo mediante un sistema de sujeción basado en la deformación elástica simétrica de unos dispositivos de sujeción auto-centrantes. Por su parte, en el LFE inferior, donde el espacio anular es mucho más reducido y aún el más mínimo movimiento del pistón podría afectar el desarrollo del flujo significativamente, el pistón se sostiene mediante un ajuste por interferencia con el cilindro interno del cuerpo. En la Figura 34 se presenta un detalle de la forma en que se posiciona el pistón en forma concéntrica dentro del cilindro para generar el

pasaje de flujo, puede verse adicionalmente la forma en que el diseño del dispositivo de sujeción también sirve de acondicionador de flujo (*Corte AA*), preparándolo para su transición de régimen turbulento a laminar. En la Figura 34 también se presenta la constitución externa del patrón, dotado de las conexiones para el gas, las tomas de presión y las conexiones eléctricas.

Figura 34. Detalle transversal de los LFEs patrón seleccionados



Cortesía: DH Instruments Inc.

La geometría del pasaje de flujo está diseñada de forma que el gas pase libremente a través de una trayectoria recta, reduciendo la posibilidad de que se depositen contaminantes en el interior. Adicionalmente, todas las superficies que están en contacto con el gas están pulidas por procesos eléctricos hasta obtener una rugosidad superficial de $0,15 \mu\text{m Ra}$ para evitar la acumulación de partículas que puedan pasar el sistema de filtración dispuesto aguas arriba del LFE.

El diseño compacto de los LFEs, sumado a la integración de los sensores de temperatura en su cuerpo y de los transductores de presión dentro de la consola, son características que proveen un sistema muy especial en cuanto a su movilidad. Debido a que la consola opera con transductores de presión absoluta, el alcance de medición de los transductores puede aprovecharse para medir las condiciones de los dos LFEs, de esta forma mediante un sencillo arreglo de válvulas puede hacerse la conmutación de un LFE al otro.

Lo anterior permite una disminución en los costos de calibración si se tiene en cuenta que se reduce la cantidad de instrumentos por asegurar metrológicamente. La facilidad de transporte es una ventaja incomparable en relación al proceso de envío de los patrones a un laboratorio para su recalibración. En la Tabla 15 se presentan las dimensiones y pesos aproximados de los LFEs y la consola.

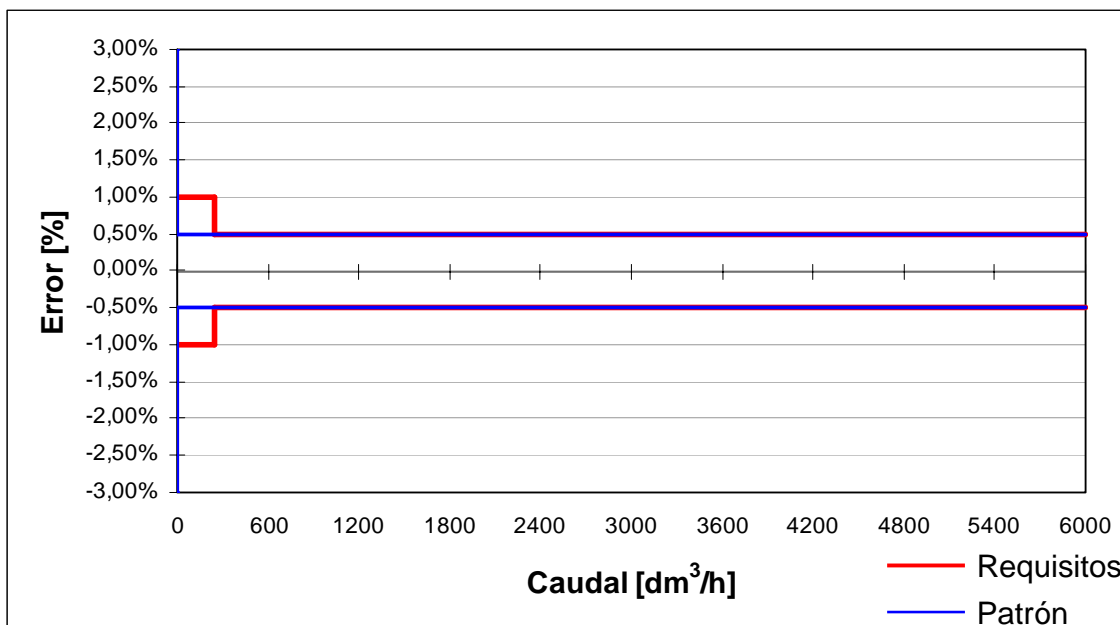
Tabla 15. Dimensiones y pesos de los LFEs y la consola

Elemento	Dimensiones [mm] Largo x Ancho x Alto	Peso [kg] Aproximado
LFE-1	165 x 50 x 75	2,90
LFE-2	160 x 50 x 75	2,80
Consola	225 x 200 x 80	2,55

En resumen, el paquete completo puede ser enviado a calibrar ocupando un volumen de 250 x 250 x 200 mm y pesar aproximadamente 10 kg (*incluyendo el empaque*).

Por último, en la Figura 35 se presenta una comparación entre el desempeño del patrón, basado en la operación conjunta de los dos LFEs seleccionados, contra los requisitos normativos que se analizaron previamente en este capítulo. Como puede observarse, el desempeño del patrón brinda una incertidumbre de medición dentro del 0,5% de la lectura sobre un alcance de 1:1000 con este mismo nivel de incertidumbre, brindando de esta forma la confiabilidad requerida para su uso como patrón de calibración de medidores residenciales. Esto es posible mediante la incorporación de un transmisor de presión diferencial adicional, usado para medir las presiones diferenciales bajas.

Figura 35. Desempeño del patrón seleccionado versus requisitos normativos



3.7.2. Selección de la instrumentación secundaria

Como se pudo observar anteriormente, los LFEs se seleccionaron de acuerdo con el caudal volumétrico al cual operarían para calibrar los medidores de gas residenciales, sin embargo, para alcanzar la incertidumbre de medición exigida por la normativa, fue necesario seleccionar una consola dotada de la instrumentación necesaria para cumplir los requisitos metrológicos correspondientes a la tercera parte del máximo error permisible para el medidor a calibrar.

Figura 36. Consola de medición



Cortesía: DH Instruments Inc.

A continuación se presentan las características específicas de los instrumentos asociados a la consola y aquellas asociadas a los instrumentos secundarios necesarios para complementar el banco de calibración.

3.7.2.1. Presión

En la Tabla 16 se presentan las características de los instrumentos para medición de presión asociados a la consola de los LFEs.

Tabla 16. Características de los instrumentos de presión (LFEs)

Parámetro	Presión absoluta	Presión diferencial
Tipo de transductor	Silicón piezo-resistivo	Silicón piezo-resistivo
Alcance de medición	0 a 600 kPa	0 a 12,5 kPa
Resolución	6 Pa	0,14 Pa
Repetibilidad	$\pm 0,01\%$ (FS)	$\pm 0,01\%$ (FS)
Incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,05% (FS) por un año ▪ 20 Pa + 0,05% ΔP (cuando se mide presión diferencial) ▪ Libre de error de ceros 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,05% (FS) por un año ▪ Libre de error de ceros

En la Tabla 17 se presentan las características de los instrumentos de presión asociados a los medidores objeto de calibración. Se seleccionaron manómetros de presión diferencial de carátula, teniendo en cuenta que el impacto sobre la incertidumbre de medición no es muy fuerte y que la indicación directa de la caída de presión a través del medidor favorece la verificación de este requisito.

Tabla 17. Características de los instrumentos de presión (*medidores en prueba*)

Tipo de instrumento	Manómetro diferencial análogo
Tecnología	Diafragma
Alcance de medición	0 a 250 Pa
Incertidumbre	2% (FS)

3.7.2.2. Temperatura

En la Tabla 18 se presentan las características de los instrumentos para medición de temperatura asociados a la consola de los LFEs.

Tabla 18. Características de los instrumentos de temperatura (*LFEs*)

Tipo de instrumento	Termómetro de resistencia de platino RTD Pt-100
Alcance de medición	0 a 40 °C
Resolución	0,01 °C
Incertidumbre	0,05 °C

En la Tabla 19 se presentan las características de los instrumentos de temperatura asociados a los medidores objeto de calibración. Se seleccionaron termómetros de vidrio con una división de escala de 0,1 °C, teniendo en cuenta que un instrumento con dicha resolución brindará una incertidumbre de medición adecuada a los límites admisibles para la verificación de medidores de gas residenciales.

Tabla 19. Características de los instrumentos de temperatura (*medidores en prueba*)

Tipo de instrumento	Termómetro de vidrio
Líquido en la columna	Mercurio
Alcance de medición	0 a 30 °C
División de escala	0,1 °C

3.7.2.3. Condiciones ambientales

Para el monitoreo de las condiciones ambientales se seleccionó un meteorógrafo tipo tambor registrador. Este equipo mide y registra continuamente la presión atmosférica, la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Posee un reloj mecánico de precisión con una carta registradora de 7 días.

Las características de este equipo se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Características del instrumento de medición de condiciones ambientales

Tipo de instrumento	Metereógrafo tipo tambor
Temperatura ambiente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elemento bimetálico ▪ Alcance de medición: -35 a 45 °C ▪ Incertidumbre: 0,3 °C
Presión atmosférica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cápsula anerode (<i>níquel-plata</i>) ▪ Compensada por temperatura ▪ Protección por sobrecarga ▪ Incertidumbre: 0,2 hPa (<i>de la lectura</i>)
Humedad relativa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hilo de cabello natural ▪ Alcance de medición: 0 a 100 % (<i>RH</i>) ▪ Incertidumbre: 2%

3.7.2.4. Equipos y material adicional

En la Tabla 21 se presenta un listado de los equipos y materiales adicionales requeridos para el óptimo funcionamiento del sistema de calibración.

Tabla 21. Equipos y material adicional necesarios para el patrón

Compresor	Capacidad mínima: 125 dm ³ /min a condiciones estándar Presión: 700 kPa Acumulador: 200 dm ³ Preferiblemente libre de aceite
Sistema de toma de datos de volumen para los medidores a calibrar	Fibra óptica con amplificador Detecta el paso de la banda reflectora sobre el odómetro Adquiere el dato de volumen inicial y final de la consola Envía la información a un computador Programable para diferentes volúmenes de prueba Soporta hasta 9 sensores de fibra óptica
Computador personal	Procesador de 1,8 GHz Memoria RAM: 512 Mb Tarjeta de video: 64 Mb Tarjeta de red: 10/100 Mb LAN Disco duro: 60 Gb

	1 Puerto serial RS-232 4 Puertos USB Sistema operativo Windows 2000 o superior
Filtro de partículas	1 Filtro de 5 micrones 1 Filtro de 2 micrones
Filtro coalescente	Capaz de retener humedad y aceite (<i>en caso de que el compresor no sea libre de aceite</i>)
Secador de aire comprimido	Refrigerado Punto de rocío de 0 a 5 °C
Reguladores de presión	2 etapas: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 700 kPa a 250 kPa ▪ 250 kPa a 175 kPa Con manómetro incorporado
Tubería, válvulas y accesorios	Necesarios para interconectar en forma efectiva los diferentes elementos del sistema de calibración

3.7.3. Configuración del patrón y operación

Los LFEs se localizan aguas arriba de los medidores bajo ensayo, de forma que puedan operar a una presión manométrica de aproximadamente 175 kPa, con los objetivos de: 1) vencer la caída de presión ofrecida por los pasajes de flujo, especialmente en el LFE de menor tamaño, y 2) evitar la contaminación de los LFEs con residuos provenientes de medidores usados que se quieran ensayar en el sistema de calibración.

El sistema inicia con el compresor de aire, el cual preferiblemente debe ser libre de aceite con la finalidad de preservar el desempeño de los LFEs por extensos períodos de tiempo y evitar costos adicionales por la implementación de filtros para remoción de aceite. El compresor acumula aire en un tanque con capacidad de 200 dm³, localizado junto al equipo de compresión.

Del tanque acumulador se deriva una tubería hasta el local de calibraciones con condiciones controladas de temperatura. Al ingresar al local es aconsejable hacer pasar el aire previamente por un haz de tuberías de cobre, de forma que se aproveche la temperatura del ambiente para un primer proceso de secado. El aire pasa por el secador de aire comprimido y posteriormente por un filtro coalescente obteniéndose una remoción efectiva del vapor de agua y las posibles trazas de aceite, luego de filtrados los condensables, el aire se almacena en un tanque acumulador de igual capacidad al instalado junto al compresor, de esta manera se tiene una reserva suficiente para ejecutar las calibraciones conservando una estabilidad térmica apropiada durante el período de actividades del laboratorio. El haz de tuberías, el secador, el filtro y el tanque acumulador poseen trampas y válvulas para drenar los posibles condensados que puedan acumularse.

Del tanque acumulador se pasa al sistema de regulación y filtrado de partículas, compuesto por una primera etapa de regulación, donde la presión baja de 700 a 250 kPa, posteriormente se remueven las partículas con tamaño superior a 5 micrones. La segunda

etapa de regulación disminuye la presión hasta 175 kPa, un valor óptimo para la operación de los LFEs. Luego de la última regulación de presión se instala otro filtro para retener partículas hasta de 2 micrones de tamaño.

Aguas arriba y aguas abajo de los LFEs se instala un par de válvulas de bola con el fin de aislar los medidores de acuerdo con la necesidad operacional. Como se estudió en el Capítulo I, es importante dotar a los LFEs de unas longitudes rectas aguas arriba apropiadas, de forma que se logre un perfil de velocidades completamente desarrollado que pueda igualmente ser reproducido en el laboratorio donde se calibren los LFEs.

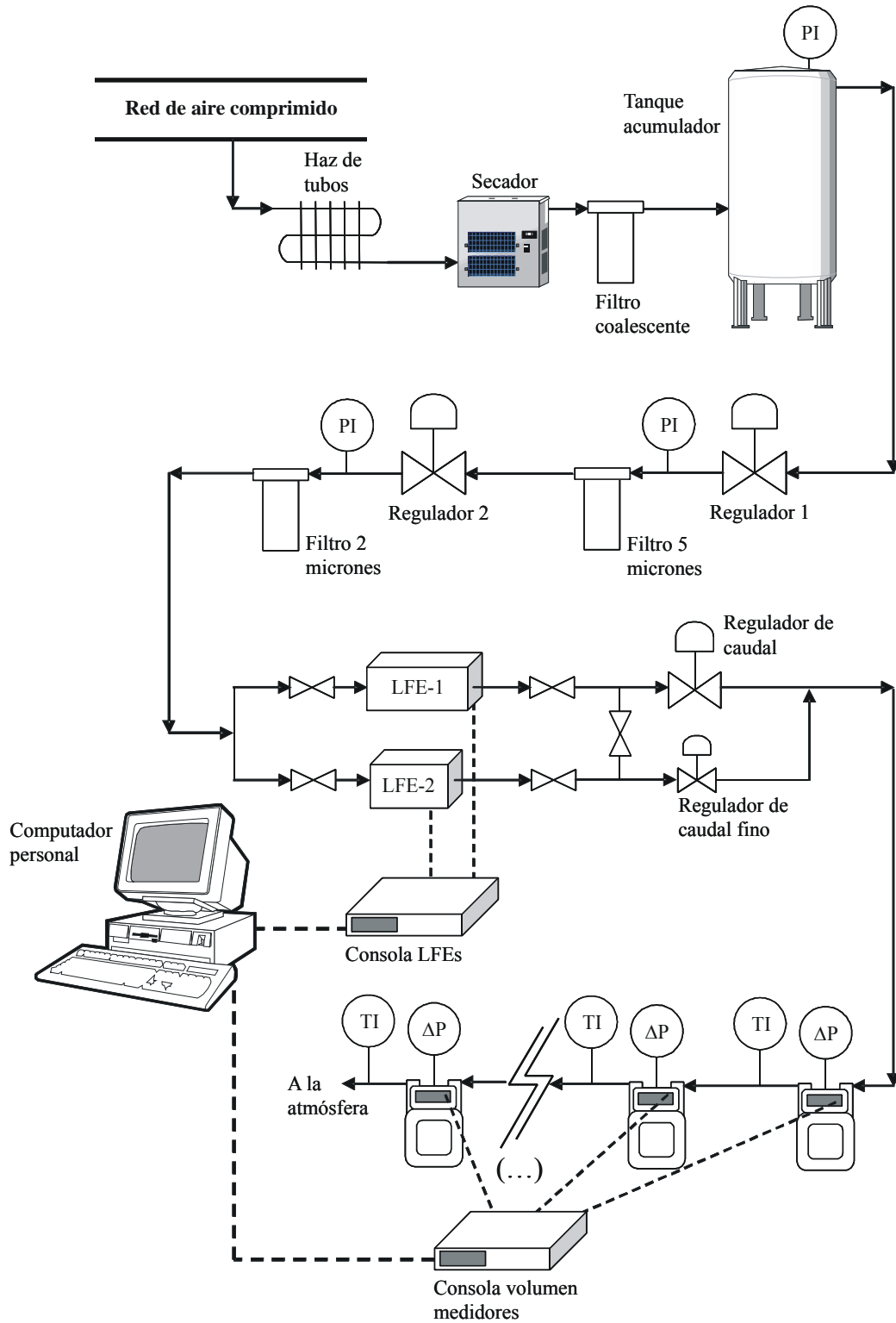
Aguas abajo de los LFEs se instalan dos válvulas para regular el caudal de calibración, una válvula de aguja fina para ajustar los caudales bajos (*inferiores a 300 dm³/h*) y una válvula de mayor tamaño para ajustar los caudales altos (*hasta 6000 dm³/h*). A continuación se disponen los medidores a calibrar con sus respectivos manómetros para medir la presión diferencial y los termómetros sobre la conexión de la salida del medidor bajo ensayo. Por último, el aire descarga a la atmósfera.

La indicación volumétrica de los medidores bajo ensayo se adquiere mediante un conjunto de sensores de fibra óptica enfrentados contra la banda reflectora que usualmente se instala en el odómetro mecánico de los medidores. Previamente se configura el volumen que se hará pasar por el medidor bajo ensayo, la señal de los sensores llega al sistema de toma de datos de volumen y va almacenándose en un contador electrónico que se encarga de solicitar el volumen indicado por el patrón al inicio y al final del período de calibración (*correspondiente al inicio y a la detención del contador*). Una vez finalizado el período de calibración para un caudal en particular, los datos se envían a un computador.

El computador se comunica con la consola de los LFEs y con el sistema de toma de datos de volumen. Para las calibraciones puede desarrollarse una hoja de cálculo de forma que se facilite el procesamiento de los datos y se genere en forma automática el informe de la calibración.

En la Figura 37 se presenta un esquema de la propuesta para el sistema de calibración.

Figura 37. Esquema propuesto para el sistema de calibración



3.7.4. Aseguramiento metrológico

Debe tenerse presente que los LFEs, por constitución, son simplemente unos dispositivos que ofrecen una restricción al flujo, de forma que al interior de sus pasajes se genera un régimen laminar, aprovechado para inferir el caudal a partir de la presión diferencial y las propiedades del gas (*especialmente la viscosidad*), adicionalmente, intervienen algunos parámetros de tipo dimensional, relacionados con las características constructivas del LFE que tienen una influencia sobre el flujo, tal y como se estudió en la ley de Poiseuille-Hagen.

Aplicando esta ley al flujo de un fluido compresible a través de un pasaje anular como aquel asociado a los LFEs seleccionados, se obtiene la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 21} \quad Q_{v(P,T)} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot R \cdot h^3}{\mu_{(P,T)} \cdot 6 \cdot L}$$

donde:

$Q_{v(P,T)}$	Caudal volumétrico a las condiciones de presión y temperatura del flujo
ΔP	Presión diferencial a través del LFE medida en sus tomas de presión
R	Radio del pasaje de flujo
h	Espacio entre el pistón y el cilindro
$\mu_{(P,T)}$	Viscosidad absoluta del gas a las condiciones de presión y temperatura del flujo
L	Longitud del pasaje de flujo anular

Los términos de carácter dimensional, las constantes (π) y los números pueden agruparse en un solo término dimensional que determina el alcance de medición del LFE, este término se denominará C_D .

$$\text{Ecuación 22} \quad C_D = \frac{\pi \cdot R \cdot h^3}{6 \cdot L}$$

El término C_D se calcula teóricamente con la Ecuación 22, sin embargo, una estimación más exacta de éste parámetro se determina mediante una calibración contra un patrón de caudal⁷, denominándose C_G . En la práctica, para obtener niveles bajos de incertidumbre, siempre se usa la calibración individual para obtener el valor de C_G .

Reemplazando el valor de C_G en la Ecuación 21 obtenemos una nueva expresión, en la cual se resalta el hecho de que el caudal volumétrico a condiciones del flujo es función exclusiva de la presión diferencial a través del LFE, de la viscosidad del gas a las

⁷ Puede hacerse una similitud con las formas en que puede calcularse el coeficiente de descarga para una tobera de flujo crítico: 1) mediante el uso de correlaciones soportadas sobre una base de datos experimental (*P. Ej. ISO 9300*) conservando unos parámetros constructivos y de diseño, o 2) mediante la ejecución de una calibración empleando un patrón de caudal.

condiciones del flujo y del parámetro C_G , de carácter netamente dimensional y obtenido con exactitud mediante calibración directa.

$$\text{Ecuación 23} \quad Q_{v(P,T)} = \frac{\Delta P}{\mu_{(P,T)}} \cdot C_G$$

Aunque éste enfoque es simplificado (*de acuerdo con lo visto en el Capítulo I*), demuestra fácilmente el “¿por qué?” los LFEs son dispositivos para medición de caudal que conservan sus propiedades por períodos de tiempo prolongados si se conservan con unas condiciones adecuadas que garanticen su estabilidad dimensional.

Por otra parte, se visualiza la importancia que reviste la medición de presión diferencial y el cálculo de la viscosidad, debido a que juntos son la base del método basado en el flujo laminar de gas.

En este sentido, si se garantizan en forma “*perfecta*” las condiciones para la estabilidad dimensional del LFE, los únicos dispositivos que podrían afectar la medición serían la medición de presión diferencial y la de presión absoluta y de temperatura para obtener la viscosidad empleando correlaciones empíricas. Estos elementos se encuentran incorporados al interior de la consola.

Para la calibración en laboratorio del sistema de medición basado en LFEs, se remiten estos dispositivos junto con la consola que contiene la instrumentación y los algoritmos para calibrar el conjunto, ajustándose las desviaciones de los instrumentos y los factores necesarios para compensar los cambios que hayan sufrido los LFEs por la acción del flujo y el trato.

Los resultados presentados por Wright [20] sobre el comportamiento metrológico (*variaciones del desempeño*) de 16 LFEs respecto al tiempo, basado en el análisis de los resultados de sus calibraciones en NIST durante un período de casi 30 años (*1970 a 1998*) muestran unos valores muy bajos de deriva, del orden de +0,017% / año para la media correspondiente a la población analizada. El promedio del intervalo de recalibración para los LFEs analizados fue de 3,8 años y de acuerdo con la información suministrada, se presume que aquellos LFEs que presentaron mayores desviaciones (*del orden de 0,3% / año*) se afectaron debido a maltrato por golpes y a su uso con gas contaminado.

En este orden de ideas, la estabilidad a través del tiempo, para un LFE depende únicamente de la estabilidad mecánica de sus partes, especialmente aquellas que definen los pasajes de flujo donde se desarrolla el régimen laminar. En este sentido es imprescindible protegerlos de choques severos y de su uso con gases que contengan humedad, aceite, impurezas u otra clase de contaminantes.

El fabricante recomienda realizar las calibraciones con periodicidad anual para el conjunto completo (*LFEs + consola*). Sin embargo, de acuerdo con la información disponible acerca

de la estabilidad de los LFEs, el intervalo entre calibraciones podría ampliarse si se estudia el comportamiento del mismo respecto al tiempo, buscando que la tendencia no se salga de los límites de control específicos.

El aseguramiento metrológico de los LFEs puede realizarse en un laboratorio de calibración que soporte el alcance de medición de estos elementos al nivel de incertidumbre requerido. Por su parte, la calibración de los instrumentos asociados a la consola puede realizarse en un laboratorio acreditado para las magnitudes presión absoluta, presión diferencial y temperatura dentro de los alcances de medición de estos dispositivos, los cuales fueron analizados previamente en éste capítulo. En este caso, la incertidumbre que ofrezca el laboratorio de calibración también juega un papel decisivo.

CAPÍTULO IV

4. COSTOS Y COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

4.1. COSTOS PATRÓN BASADO EN LFEs

Para la evaluación de los costos se consultaron los precios con los proveedores a nivel nacional e internacional. Es importante aclarar que no se evaluaron los costos asociados al local de calibración (*infraestructura*) y su sistema de aire acondicionado puesto que se asume que son necesarios para cualquier laboratorio y en tal medida son costos comunes que no son útiles para propósitos de la comparación.

En la Tabla 22 se presentan los costos de los equipos y accesorios requeridos exclusivamente para la consolidación del patrón basado en LFEs, es decir, se excluyen los costos de equipos, instrumentos y demás componentes que sean comunes con los patrones basados en otras tecnologías (*P. Ej. Termómetros de los medidores a calibrar*).

Posteriormente, en la Tabla 23 se presenta el costo del aseguramiento metrológico que requiere cada uno de los equipos e instrumentos de medición asociados exclusivamente al patrón basado en LFEs (*incluye los costos del transporte hasta el sitio de calibración, asumiendo que ésta se realiza inicialmente en el exterior*).

Tabla 22. Costo de equipos y accesorios exclusivos al patrón de LFEs

Detalle	Cantidad	Valor unitario [Millones de pesos]	Costo total [Millones de pesos]
LFE-1	1	\$ 25,000	\$ 25,000
LFE-2	1	\$ 16,000	\$ 16,000
Consola LFEs	1	\$ 28,000	\$ 28,000
Compresor libre de aceite	1	\$ 5,000	\$ 5,000
Secador	1	\$ 3,500	\$ 3,500
Reguladores de presión	2	\$ 0,350	\$ 0,700
Filtro 5 micrones	1	\$ 0,250	\$ 0,250
Filtro 2 micrones	1	\$ 0,400	\$ 0,400
TOTAL			\$ 78,850

Tabla 23. Costo del aseguramiento metrológico exclusivo al patrón de LFEs

Detalle	Cantidad	Valor unitario [Millones de pesos]	Costo total [Millones de pesos]
Calibración LFE-1	1	\$ 1,500	\$ 1,500
Calibración LFE-2	1	\$ 1,500	\$ 1,500
Calibración consola	1	\$ 3,000	\$ 3,000
TOTAL			\$ 6,000

En relación al patrón basado en LFEs, la suma del costo de los equipos y el aseguramiento metrológico inicial suman 84,850 millones de pesos.

En la Tabla 24 se presenta el costo asociado a los equipos y accesorios que requiere cualquier laboratorio de calibración cuya actividad se enfoque hacia la calibración de medidores de gas. Los bancos patrón se proyectan para calibrar 9 medidores de diafragma en serie, siguiendo las características del esquema de montaje presentado en la Figura 37.

Tabla 24. Costo de equipos y accesorios comunes a cualquier patrón

Detalle	Cantidad	Valor unitario [Millones de pesos]	Costo total [Millones de pesos]
Consola volumen medidores	1	\$ 8,000	\$ 8,000
Computador personal	1	\$ 2,000	\$ 2,000
Metereógrafo	1	\$ 6,000	\$ 6,000
Termómetros	9	\$ 0,150	\$ 1,350
Manómetros ΔP	9	\$ 0,250	\$ 2,250
Válvula reguladora de caudal (<i>bajo</i>)	1	\$ 0,500	\$ 0,500
Válvula reguladora de caudal (<i>alto</i>)	1	\$ 0,250	\$ 0,250
Tubería, válvulas y accesorios	1	\$ 2,000	\$ 2,000
TOTAL			\$ 22,350

En la Tabla 25 se presenta el costo del aseguramiento metrológico que requiere cada uno de los equipos e instrumentos de medición asociados exclusivamente al patrón basado en LFEs (*incluyendo los costos del transporte hasta el sitio de calibración, asumiendo que ésta se realiza a nivel nacional*).

Tabla 25. Costo del aseguramiento metrológico elementos comunes a cualquier patrón

Detalle	Cantidad	Valor unitario [Millones de pesos]	Costo total [Millones de pesos]
Calibración metereógrafo	1	\$ 1,500	\$ 1,500
Calibración termómetros	9	\$ 0,125	\$ 1,125
Calibración manómetros ΔP	9	\$ 0,150	\$ 1,350
TOTAL			\$ 3,975

El costo de los equipos y accesorios comunes a cualquier patrón, incluyendo su respectivo aseguramiento metrológico suman 26,325 millones de pesos.

En total, la inversión requerida para implementar un patrón de calibración semi-automatizado, basado en LFEs es de 111,175 millones de pesos.

4.2. COSTOS DE OTRAS TECNOLOGÍAS

Se consultaron los costos de los patrones tipo cámara húmeda y tipo tobera de flujo crítico considerando que son las dos tecnologías contra las cuales competiría el patrón basado en LFEs.

En la Tabla 26 se presentan los costos asociados a la implementación de un laboratorio de calibración basado en cámaras húmedas.

Tabla 26. Costo de un sistema patrón basado en cámaras húmedas

Detalle	Cantidad	Valor unitario [Millones de pesos]	Costo total [Millones de pesos]
Cámara húmeda 1	1	\$ 30,000	\$ 30,000
Cámara húmeda 2	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Dispositivo contador de pulsos	1	\$ 1,000	\$ 1,000
Soplador	1	\$ 2,000	\$ 2,000
Líquido sellante (aceite mineral)	1	\$ 0,400	\$ 0,400
Calibración cámara húmeda 1	1	\$ 3,000	\$ 3,000
Calibración cámara húmeda 2	1	\$ 2,500	\$ 2,500
Calibración termómetros	4	\$ 0,125	\$ 0,500
Calibración manómetros	2	\$ 0,150	\$ 0,300
TOTAL			\$ 59,700

Sumando el costo de los equipos y accesorios comunes a cualquier patrón, obtenidos en el numeral anterior (26,325 millones), al costo del sistema patrón basado en cámaras húmedas se obtiene un total de 86,025 millones de pesos. La frecuencia de calibración recomendada para las cámaras húmedas es anual.

En el caso del patrón basado en la tecnología de toberas de flujo crítico, debido a que este tipo de patrón se comercializa como una unidad independiente, compuesta por todos los equipos, instrumentos y accesorios necesarios para la ejecución de las calibraciones, se consultó el costo de un banco para ejecutar la calibración de medidores residenciales G1.6 a G4, de forma que fuera posible reproducir los caudales requeridos para la obtención de la curva de desempeño del medidor en caso de aprobación de modelo (7 caudales).

El precio obtenido para dicho patrón fue de 150 millones de pesos, incluyendo el aseguramiento metrológico. El banco está compuesto por 9 toberas de flujo crítico. Con respecto a la calibración futura de las toberas (el fabricante recomienda hacerlo cada 3 años), el costo de calibrar únicamente las toberas (sin incluir la instrumentación secundaria) es de 25 millones de pesos.

4.3. COMPARACIÓN

En la Tabla 27 se presenta una comparación entre las características de las tres tecnologías (LFEs, cámaras húmedas y toberas de flujo crítico).

Tabla 27. Comparación entre las tecnologías

Detalle	Cámaras húmedas	Toberas flujo crítico	LFEs
Principio de funcionamiento	Mecánico	Termodinámico	Mecánica de fluidos
Características de funcionamiento	Elementos móviles	Elemento de flujo	Elemento de flujo
Elementos adicionales	Aceite baja presión vapor	Ninguno	Ninguno
Fluido de operación	Aire ambiente	Aire ambiente	Aire comprimido seco
Comportamiento óptimo	Medios caudales	Medios - Altos caudales	Bajos caudales
Robustez ante impurezas	Alta	Baja	Baja
Necesidad de filtros	No	Si	Si
Estabilidad a largo plazo	Pierde su desempeño	Conserva su desempeño	Conserva su desempeño
Espacio ocupado para transporte	Muy voluminoso	Compacto	Compacto
Peso al transportar	Alto	Bajo	Bajo
Personal requerido	1 operador	1 operador	1 operador
Resultado dependiente del operador	Si	No	No
Costos de operación	Bajos (<i>soplador</i>)	Medios (<i>bomba vacío</i>)	Altos (<i>compresor</i>)
Intervalo recalibración patrón	1 año	3 años	1 año inicio, 3 años post.
Intervalo recalibración instrumentos	1 año	1 año	1 año
Capacidad autodiagnóstico	No	No	Si
Soporte técnico	Nacional	Nacional	Internacional
Difusión local de la tecnología	Alta	Media	Baja / Nula
Incertidumbre de medición	0,5%	0,2 a 0,4%	0,2 a 0,5%
Costos aseguramiento patrón	6,3 millones	25 millones	6 millones
Costo total del patrón	86,025 millones	150 millones	111,175 millones

En resumen, con respecto a los costos, se puede observar que el patrón basado en LFEs es una nueva opción viable económicamente, de tal forma que se sitúa en medio de los costos asociados a las tecnologías de cámaras húmedas y toberas de flujo crítico según el nivel de inversión requerido para la infraestructura del sistema de calibración.

Por su parte, los costos de aseguramiento metrológico son inferiores a los de las dos tecnologías, con la ventaja adicional de que los LFEs son elementos de flujo que conservan sus características por extensos períodos de tiempo, pudiendo aumentarse los intervalos de calibración si se demuestra su estabilidad mediante una tendencia estadística.

Con respecto al desempeño metrológico, las tres tecnologías son aptas para su uso como patrones de medición en la calibración de medidores residenciales, no obstante, las toberas y los LFEs poseen una ventaja en cuanto a su nivel de incertidumbre respecto a las cámaras húmedas por cuanto estas son elementos mecánicos sujetos a fricción y desgaste permanentes.

En relación a la operación de los sistemas, todos pueden ser atendidos con un solo operario. Sobre los costos de operación, es notable la necesidad de usar aire comprimido seco y

filtrado para suministro a los LFEs, situación que amerita el uso de un compresor y sistemas de tratamiento al aire comprimido (*secado, filtrado*).

Por el momento, la tecnología de los LFEs no está muy difundida en el país, de la misma forma, el soporte técnico sólo se puede conseguir en el exterior. Sin embargo, por sus características constructivas, los LFEs son elementos compactos y livianos que pueden ser transportados fácilmente y calibrados a un costo razonable en el exterior. Un aspecto a resaltar es que la consola de los LFEs posee funciones de verificación de la instrumentación secundaria, de tal forma que puede tenerse una confiabilidad permanente en las mediciones a través de un autodiagnóstico basado en el uso de instrumentos de referencia incorporados en su interior y en la operación de válvulas de auto-ceraje.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La tecnología de los LFEs ha sido ampliamente estudiada y documentada a nivel internacional, encontrándose disponibles numerosos artículos de carácter científico y técnico relacionados con su operación y características metrológicas.
- Existen tres reconocimientos fundamentales en cuanto a la tecnología de los LFEs: 1) son elementos que conservan su desempeño metrológico por extensos períodos de tiempo sin variar significativamente sus propiedades; 2) son el patrón de transferencia por excelencia en las comparaciones entre laboratorios de caudal de gas a nivel internacional; y 3) su funcionamiento se basa en principios básicos de la mecánica de los fluidos y en las propiedades del aire, siendo ésta una de las sustancias más estudiadas por la comunidad científica.
- Técnicamente es viable su aplicación para calibrar cualquier tipo de medidores entre $0,0001 \text{ dm}^3/\text{min}$ y $100 \text{ dm}^3/\text{min}$, con incertidumbres de medición del orden de 0,2 a 0,5%, según el diseño del LFE, la clase de instrumentación secundaria y la forma en que se obtengan las propiedades del gas.
- La inversión requerida para la implementación de los LFEs como sistema de calibración es intermedia entre la de las cámaras húmedas y las toberas de flujo crítico, siendo estas dos las tecnologías más difundidas en nuestro país a nivel de laboratorios acreditados de las empresas distribuidoras de gas natural.
- Una ventaja fundamental de los LFEs respecto a las demás tecnologías es que el costo de asegurarlos metrológicamente es más bajo, sumado a la posibilidad de usar intervalos de calibración más amplios, del orden de los 3 años de acuerdo con el cuidado que se tenga en su operación. Las características de ocupar poco volumen y bajo peso son incomparables al momento de su transporte hasta el laboratorio de calibración, ahorrando costos de envío, facilitando la logística del desplazamiento y ofreciendo una seguridad mayor en el mismo.
- Como desventajas se pueden mencionar los siguientes tres aspectos: 1) la tecnología no está difundida en nuestro país; 2) no existe hasta el momento soporte a nivel nacional; y 3) requiere el uso de aire comprimido, secado y filtrado, lo cual implica el costo de operación de un compresor, un secador y un sistema de filtración.
- Indiscutiblemente hay una insuficiencia de laboratorios acreditados para calibración de medidores de gas residenciales, tanto a nivel de empresas distribuidoras de gas natural

como de laboratorios de “tercera parte”. De esta forma es imposible brindar argumentos sólidos a los usuarios del servicio en cuanto a la exactitud de los volúmenes facturados que redunden en una confianza por parte de los consumidores y una transparencia en el proceso de compra-venta de gas. El establecimiento de un número mayor de laboratorios permitiría cumplir las exigencias de metrología legal existentes y adicionalmente la implementación de programas de muestreo estadístico por regiones para controlar la exactitud de las mediciones.

5.2. RECOMENDACIONES

- Estudiar la viabilidad de combinar los LFEs con patrones tipo tobera de flujo crítico para la calibración de medidores de gas residencial, de forma que se constituya un sistema de calibración “hibrido”. Un sistema de este tipo, operando a presión, brindaría una confiabilidad muy alta en los bajos caudales y un mejor aprovechamiento de la capacidad de las toberas, de forma que una menor cantidad de éstas (*posiblemente dos*) proveerían un número mayor de caudales de calibración, mediante la variación de las condiciones de presión a su entrada.
- De acuerdo con los resultados del estudio de viabilidad planteado anteriormente, se recomienda definir un programa piloto para evaluar en forma práctica las ventajas del método. El programa puede servir, por ejemplo, para la ejecución de una intercomparación entre los laboratorios acreditados en Colombia, aprovechando las características que ofrecen los LFEs y las toberas de flujo crítico como patrones de transferencia.

REFERENCIAS

- 1 J. D. Wright, “*What is the “Best” Transfer Standard for Gas Flow?*” Proceedings of the 2003 FLOMEKO (*Groningen, Netherlands: Gasunie 2003*)
- 2 Ariza L. Emiliano, “*Estudio Técnico-Económico de un Método para Medir la Viscosidad del Gas*” Tesis de Grado Universidad Industrial de Santander. 2000
- 3 Roberson, J. A., and C. T. Crowe, “*Engineering Fluid Mechanics*”, Boston: Houghton Mifflin Company, 1975
- 4 Ruegg, F. W., and H. H. Allion, “*An Examination of the Effects of Heat Transfer and Compressible Flow on the Performance of Laminar Flowmeters*”, Fluid Meters Golden Anniversary Conference Proceedings, p. 253, Pittsburgh, PA, 1966
- 5 Steele, D. I., and L. B. Orbach, “*Theory and Use of the Vol-O-Flo* Meter*”, National Instrument Laboratories, Inc., Rockville, MD, 1963
- 6 Baker, D. W., and M. R. Shafer, “*Preliminary notes on Laminar Flowmeters Flowing Gases*”, internal document of the National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1967
- 7 Bean, H. S. (editor), “*Fluid Meters*”, Report of ASME Research Committee on Fluid Meters, sixth ed., New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1971
- 8 Todd, D. A., “*A ‘Universal Calibration Curve’ for Laminar Flowmeters*”, Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, volume 2, p. 695, Research Triangle Park, NC: ISA, 1981
- 9 Todd, D. A., “*A Useful Format for Presentation of Calibration Results for Laminar Flowmeters*”, 7992 NCSL Workshop and Symposium Proceedings, p. 571, Boulder, CO: National Conference of Standards Laboratories, 1992
- 10 Fain, D. E., “*Calibration of a Laminar Flowmeter*” Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 2, p. 707, Research Triangle Park, NC: ISA, 1981
- 11 Delajoud, P., and M. Girard, “*A High Accuracy, Portable Calibration Standard for Low Mass Flow*”, XIII IMEKO World Congress of Metrology Proceedings, p. 1, Torino, Italy, 1994

- 12 Tison, S. A., and L. Berndt, "*High-Differential-Pressure Laminar Flowmeter*", 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meetings Proceedings, p. 1, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1997
- 13 Todd, D. A., "*An Experimental Investigation of the Absolute Viscosity of Argon and Dry Air Relative to the Absolute Viscosity of Nitrogen Using Laminar Flowmeters*", 1982 Measurement Science Conference Proceedings, p. 183, San Diego, CA: Measurement Science Conference, 1982
- 14 Jones, F. E., "*Interpolation Formulas for Viscosity of Six Gases: Air, Nitrogen, Carbon Dioxide, Helium, Argon, and Oxygen*", NBS Technical Note 1186, Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1984
- 15 Vogel, E., "*Precision Measurement of the Viscosity Coefficient of Nitrogen and the Rare Gases between Room Temperature and 650 K*" Ber. Bunsenges. Phys. Chem., volume 88, p. 997, Weinheim, Germany: Ver-lag Chemie GmbH, 1984
- 16 Kestin, J., and J. H. Whitelaw, "*Measurements of the Viscosity of Dry and Humid Air*", Humidity and Moisture, Measurement and Control in Science and Industry, volume 3, p. 301, New York: Reinhold Publishing Company, 1963
- 17 Lemmon, E., McLinden, M., and Huber, M., 2002, "*Refprop 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties*", NIST Standard Reference Database 23, Version 7.0, 7/30/02, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado
- 18 Hilsenrath, J., Beckett, C. W., Benedict, W. S., Fano, L., Hoge, H. J., Masi, J. F., Nuttall, R. L., Touloukian, Y. S., and Woolley, H. W., "*Tables of Thermal Properties of Gases*", NBS Circular 564, 1955
- 19 Johnson, Robert C., "*Real Gas Effects in Critical Flow through Nozzles and Tabulated Thermodynamic Properties*", NASA Technical Note D-2565, January, 1965
- 20 Wright, J. D., "*The Long Term Calibration Stability of Critical Flow Nozzles and Laminar Flow Meters*", NCSL Conference Proceedings, Albuquerque, NM (1998), 443-462
- 21 Wright, J. D., "*Gas Property Equations for the NIST Fluid Flow Group Gas Flow Measurement Calibration Services*", NIST (2004)
- 22 Osorio B. Henry A., y Ramos S. Jorge C. "*Probador Tipo Campana para Medidores de Flujo de Gas*". Tesis de Grado Universidad Industrial de Santander. 2000.

BIBLIOGRAFÍA

- Fox, R.W. & McDonald, A.T. *“Introducción a la mecánica de los fluidos”*. Editorial McGraw-Hill. 4ta Edición. 1995
- Spitzer, D.W. *“Flow Measurement – Practical Guides for Measurement and Control”*. Capítulo 10 *“Laminar Flow Elements”* Autor: Todd, David A. Jr. Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). 2nd Edition. 2001
- *“Memorias de la 1ra Jornada Técnica sobre Medicion de Gas”*. CDT de GAS, IPT, CENAM, NIST. 2002.
- *“Memorias de la 3ra Jornada Técnica sobre Medicion de Gas – Desarrollos Nacionales”*. CDT de GAS, IPT, CENAM. 2004.
- Miller, R.W. *“Flow Measurement Engineering Handbook”*. McGraw-Hill. 1983.
- Boyes, W. *“Instrumentation Reference Book”*. Butterworth-Heinemann, Reed Elsevier Group. 3rd Edition. 2003.
- Resolución CREG 067 de 1995 *“Código de Distribución de Gas Combustible por Redes”*
- Norma Técnica Colombiana NTC 2728 *“Medidores de Gas Tipo Diafragma”*, 2005
- Norma Técnica Colombiana NTC 2826 *“Aparatos Mecánicos. Dispositivos Generales para Medidores de Volumen de Gas”*, 1990
- International Recommendation OIML R 31 *“Diaphragm Gas Meters”*. 1995
- International Recommendation OIML R 6 *“General Provisions for Gas Volume Meters”*. 1989
- Norma Técnica Colombiana NTC 2194 *“Vocabulario de términos básicos y generales en metrología”*, 1997
- Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 *“Requisitos generales de competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”*. 2001.
- Guía Técnica Colombiana GTC 51 *“Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”*. 1997

- ISO 5168:2005 “*Measurement of fluid flow - Evaluation of uncertainties*”
- Marbán, R.M. y Pellecer, J.A. “*Metrología para no-metrólogos*”. Sistema Interamericano de Metrología (SIM) – Organización de los Estados Americanos (OEA). Segunda Edición. 2002
- “*The International System of Units (SI)*”. Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre - Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). 7th edition. 1998