

Todas las teorías son legítimas y ninguna tiene importancia. Lo que importa es lo que se hace con ellas. Jorge Luis Borges (1899-1986) Escritor argentino

Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico, orientados a producir bienes y servicios de utilidad económica, social, y política.

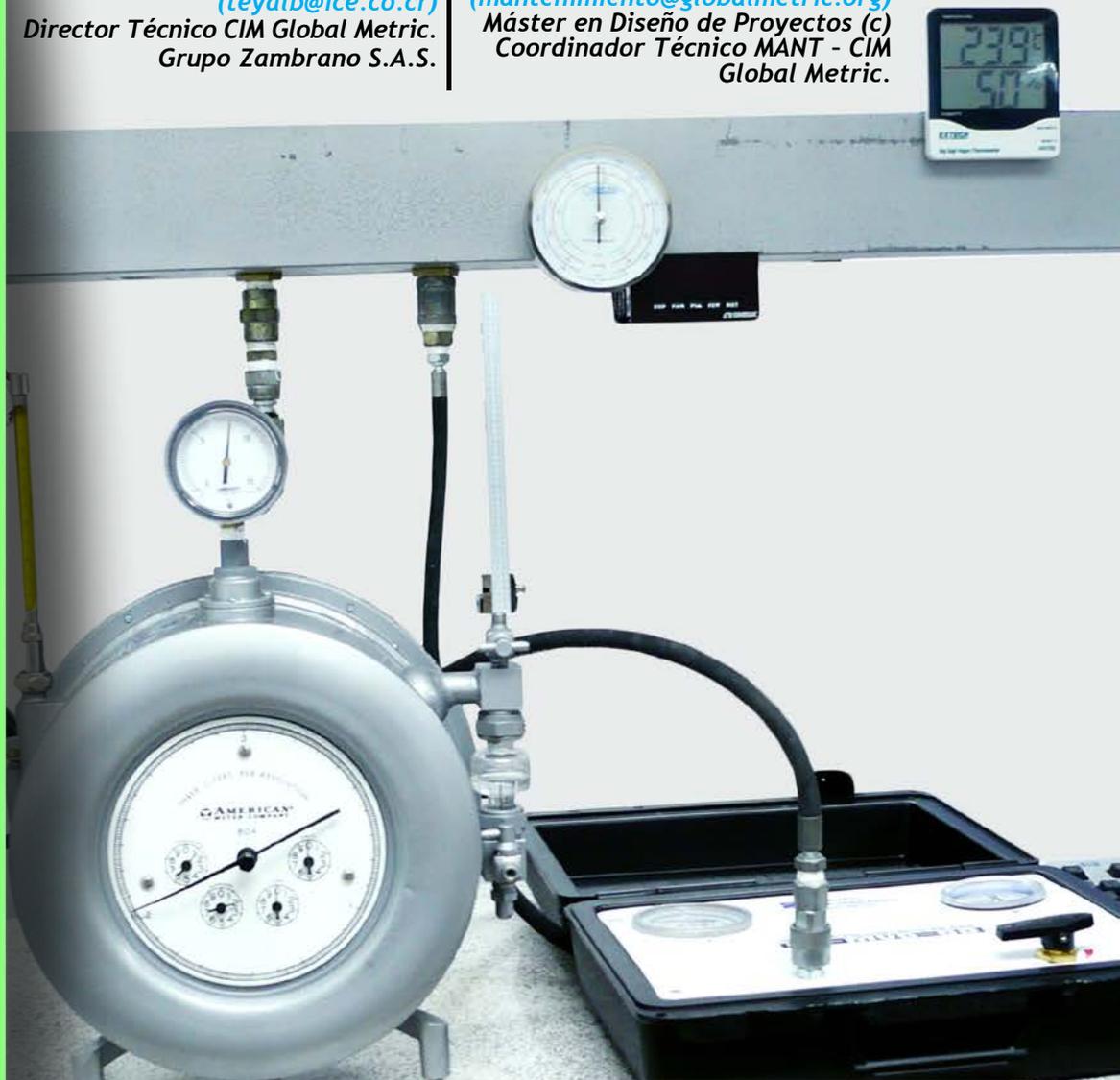
En esta sección, cada semestre, expertos nacionales y/o extranjeros, ofrecerán artículos técnicos que buscan sensibilizar a nuestros lectores, acercándolos con conocimiento, a la aplicación de la metrología en las diferentes actividades de nuestra sociedad.

Validación del desempeño metrológico

Medidor Volumétrico Portátil para verificar “in situ” a los medidores de gas tipo diafragma de uso domiciliario.

Ing. Alberto J. Díaz Tey, M.Sc.
(teyalb@ice.co.cr)
Director Técnico CIM Global Metric.
Grupo Zambrano S.A.S.

Ing. Rafael H. Rojas Millán,
(mantenimiento@globalmetric.org)
Máster en Diseño de Proyectos (c)
Coordinador Técnico MANT - CIM
Global Metric.



Resumen:

En el artículo se presentan las herramientas estadísticas para validar el desempeño metrológico de un medidor volumétrico portátil desarrollado para medir un volumen de prueba igual a 21 L, en el rango desde 4,3 L/min hasta 7,3 L/min, cuando el gas de operación se encuentra entre 20,5 °C y 31,5 °C. Este sistema de medición mide indirectamente el volumen de gas a condiciones reales de operación, a partir del tiempo de prueba y del flujo volumétrico de gas, ajustado por regresión lineal a la presión manométrica “aguas arriba” de la restricción en el rango desde 6 hasta 10 inH₂O(60°F). (desde 995,36 Pa hasta 2 488,4 Pa).

Se exponen los modelos matemáticos de la caracterización y calibración del equipo de medición, utilizando como referencia un patrón volumétrico de cámara húmeda, y los resultados de la evaluación de la precisión, considerando, cuando aplica, los lineamientos GUM. A partir de un diseño experimental, se estimó la reproducibilidad del error relativo en volumen del prototipo B14, que fue: 0,605 % (gas natural), 0,528 % (aire) y $\pm 0,385$ % (nitrógeno). Los resultados obtenidos avalan el uso del sistema de medición para funcionar como patrón de trabajo en la verificación “in situ” de los medidores volumétricos de diafragma de gas natural de uso doméstico, según los requisitos de la norma técnica colombiana NTC 5730:2009 y de la recomendación internacional OIML R137-1&2:2012.

1. INTRODUCCIÓN.

A mediados del 2009 se le solicitó a la Dirección Técnica del CIM Global Metric su colaboración para desarrollar un procedimiento alternativo de verificación "in situ" de la exactitud de los medidores de gas tipo diafragma de uso domiciliario.

Y es que durante la revisión periódica de las instalaciones para suministro de gas natural destinadas a uso residencial, se verifica la exactitud del medidor de gas considerando los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5730:2009 [1].

La solución incluiría el desarrollo de un patrón volumétrico portátil que se utilizaría en campo como patrón de trabajo [ver 5.7-2], para establecer el volumen de referencia de gas.

Desde el punto de vista reglamentario, el Código de Distribución de Gas Combustible por Redes [3], es el documento colombiano de carácter obligatorio, adoptado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas como autoridad competente, que establece los requisitos técnicos directamente o referidos, por ejemplo, a una norma.

El Código de Distribución de Gas Combustible por Redes [3], establece con respecto a los medidores volumétricos de gas que su exactitud será verificada a intervalos razonables y como máximo cada cinco años [5.29-3].

Los detalles de las operaciones de control metrológico [4], relacionadas con la aprobación de modelos y la verificación inicial y subsecuente de los medidores volumétricos de gas de uso doméstico, los transfiere a la norma técnica colombiana NTC 2728. Medidores de gas tipo diafragma [5].

En ese contexto, la NTC 5730:2009 [1] recomienda utilizar un banco de pruebas para la verificación posterior de los medidores de gas tipo diafragma [5.6.3 d)- 1], que es sin dudas, el procedimiento de referencia, sin embargo, propone un procedimiento alternativo: la utilización de una "boquilla" calibrada como patrón de trabajo [5.6.3 b)- 1], siempre que el aporte de su inexactitud en la incertidumbre expandida de la comprobación del medidor de gas tipo diafragma no afecte el cumplimiento de la siguiente desigualdad [B1.4.5- 5], aplicable a verificaciones posteriores (en servicio):

$$\frac{U_p(er_{vc})}{EMP_s} \leq \frac{1}{3} \quad (1)$$

Donde:

$U_p(er_{vc})$: Incertidumbre expandida ($\alpha \approx 5\%$) del error relativo en volumen del medidor de gas tipo diafragma verificado, en %.

EMP_s : Error máximo permitido en servicio del medidor de gas tipo diafragma, en %.

Sin embargo, la recomendación internacional OIML R137-1&2:2012 [6] establece que si no se cumple la desigualdad anterior, una alternativa para la evaluación puede consistir en reducir los errores máximos permitidos con el exceso de las incertidumbres:

$$EMP_s = \frac{4}{3} \times EMP_s - U_p(er_{vc}) \quad (2)$$

Esta expresión aplica a verificaciones posteriores (en servicio), siempre que:

$$U_p(er_{vc}) \leq EMP_s \quad (3)$$

En el presente artículo se muestran los resultados de la validación [2] de la calibración de un medidor volumétrico de gas portátil, que permiten confirmar su desempeño metrológico como patrón de trabajo en la verificación de la exactitud de los medidores de gas tipo diafragma para uso domiciliario en su revisión periódica.

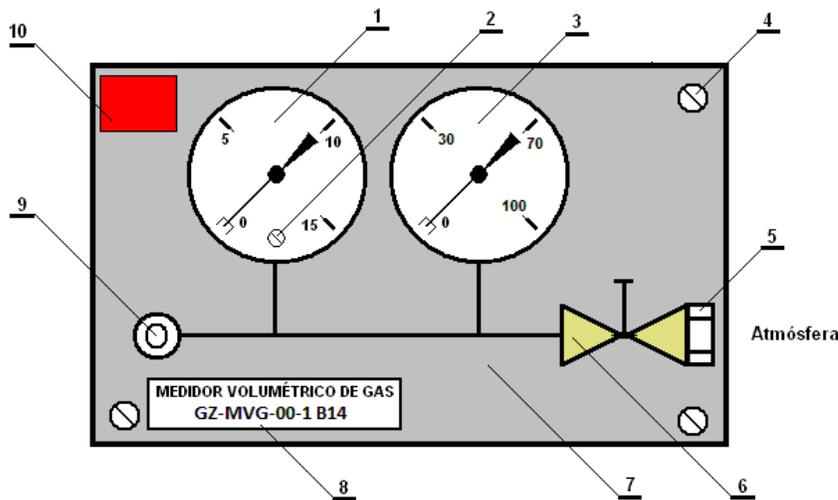
2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Medidor volumétrico de gas portátil.

El medidor volumétrico de gas (MVG) portátil desarrollado es un sistema de medición diseñado para la medición "in situ" del volumen de un fluido compresible que fluye a través de una restricción en un tiempo determinado.

El esquema simplificado del medidor volumétrico de gas portátil desarrollado se muestra en la Figura 1.

Para definir el estado termodinámico del fluido y realizar, cuando aplique, las correspondientes correcciones, se miden simultáneamente su presión manométrica estática y temperatura "aguas arriba" de la restricción (5), antes que el fluido descargue libremente a la atmósfera, utilizando un



Leyenda

1. Manómetro analógico (dispositivo secundario).
2. Tornillo de ajuste del manómetro.
3. Termómetro analógico
4. Tornillos de sujeción.
5. Restricción (dispositivo primario).
6. Válvula de apertura / cierre.
7. Caja (maleta).
8. Placa identificación.
9. Conector de entrada.
10. Sello de seguridad.

Figura 1. Esquema simplificado del medidor volumétrico portátil desarrollado.

manómetro de diafragma (1) y un termómetro bimetálico (3) y respectivamente.

En el caso de las mediciones de presión manométrica, y considerando que el suministro de gas natural es en ocasiones intermitente, el manómetro posee un dispositivo para su compensación.

Las características de ambos instrumentos de medición están referidas en la Tabla 1.

Instrumento de medición	Valor de división	Rango: hasta	Error máximo permitido (EMP)
Manómetro diafragma	0,2 inH ₂ O	15 inH ₂ O	± 1 %
Termómetro bimetálico	1 °C	100 °C	± 1 %

Tabla 1. Características metrológicas del manómetro y termómetro instalados.

Nota 1. Es usual en el presente campo de aplicación que la unidad de medida de la presión manométrica se refiera en el sistema anglo-norteamericano. Su equivalencia en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es 1 inH₂O(60°F) = 248,84 Pa [7].

El manómetro analógico (1) se calibra por comparación directa con una balanza patrón de presión neumática, y si es necesario, se ajusta mediante el tornillo de ajuste (2). Por la importancia de sus mediciones en el cálculo del volumen de gas, el diseño del GZ-MVG-00-1 permite que la calibración y ajuste se realice sin desmontarlo: solo es necesario cerrar la válvula de apertura / cierre (6) y acoplar una fuente regulable de presión y el patrón de trabajo mediante una manguera al conector de entrada (9), para que el sistema se comporte como un medio isobárico.

El termómetro bimetálico (3) se calibra en un comparador isotérmico con control automático de temperatura, por comparación directa con un termómetro patrón de

resistencia de platino ($R_0=100 \Omega$), graduado según ITS-90 ($\alpha \geq 0,003 925 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [8].

La restricción (5) es un tapón monohoradado instalado al final del sistema de medición, con diámetro de orificio de salida menor que el de entrada, y está en el interior de una maleta (7), protegida de cualquier golpe o contaminación por partículas externas que afecten su geometría.

La integridad física del sistema de medición, se asegura con cuatro tornillos de sujeción (4), uno de los cuales esta sellado con un sello de seguridad (10), que demuestra con su rotura, el acceso no autorizado al interior del equipo de medición.

2.2 Caracterización del MVG portátil.

La caracterización del medidor volumétrico de gas portátil es el proceso de estimación de los coeficientes del polinomio que relaciona las variables influyentes (variables de entrada) y el flujo volumétrico del gas (variable de salida), utilizando los correspondientes resultados experimentales y las técnicas de regresión lineal [9].

Inicialmente se consideró el siguiente modelo matemático del proceso:

$$q_v = \sum_{l=0}^{\infty} a_l \times (p_1)^l + a_4 \times t_1 + a_5 \times \Delta p \quad (4)$$

Donde:

a_i : Coeficientes del polinomio.

p_1 y t_1 : Presión manométrica y temperatura del gas "aguas arriba" de la restricción, en inH₂O y °C respectivamente.

Δp : Diferencia de presiones entre la manométrica "aguas arriba" de la restricción y la atmosférica a su descarga, en inH₂O. Se calcula según:

$$\Delta p = p_1 - P_{at} \quad (5)$$

Donde:

P_{at} : Presión atmosférica durante las mediciones, en hPa.

Al resultado del ajuste mínimo cuadrático se le aplicó la prueba F-secuencial [9], para evaluar el significado estadístico de los coeficientes del polinomio, demostrándose que no son significativas estadísticamente las variables t_l y Δp , mientras que p_l si lo es en grado 2 ($p = 2$), por lo tanto, el polinomio (ecuación 4) se redujo a la siguiente ecuación:

$$q_v = \sum_{l=0}^2 a_l \times (p_1)^l \quad (6)$$

La presión manométrica (variable de entrada) es medida directamente por el manómetro analógico, mientras que el flujo volumétrico del gas (variable de salida) que fluye por la restricción, es medido indirectamente a partir de las mediciones del volumen corregido de un MVG patrón de referencia y del tiempo invertido en alcanzarlo, utilizando un cronómetro.

Los coeficientes del polinomio son estimados por métodos de regresión lineal [9] según la ecuación matricial (7):

$$\hat{a} = (p_1^T \times p_1)^{-1} \times p_1^T \times Vp_{c0} \quad (7)$$

Donde:

\hat{a} : Vector columna de los coeficientes ajustados.

Vp_{c0} : Matriz del volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia a sus condiciones de operación P_0 y T_0 .

p_l : Matriz de la presión manométrica "aguas arriba" de la restricción.

El volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia se calcula según la ecuación 8.

$$Vp_{c0} = \frac{Vp_m}{1 + 0,01 \times (er_p + \Delta er_{der})} \quad (8)$$

Donde:

er_p : Error relativo de la medición del volumen, en %. Depende del flujo volumétrico de operación y se refieren en el certificado de calibración del MVG patrón de referencia.

Δer_{der} : Corrección por deriva del error relativo del MVG patrón de referencia, en %. Su esperanza matemática es cero pero aporta incertidumbre a la medición [10].

Vp_m : Volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia, a partir de los volúmenes final e inicial de prueba, en L.

Considerando que el tiempo de prueba es el mismo, el volumen de gas medido por el MVG portátil se calcula según la ecuación 9:

$$\hat{V}_c = \tau_p \times \hat{q}_v = \tau_p \times \sum_{l=0}^2 \hat{a}_l \times (p_1)^l \quad (9)$$

Donde:

τ_p : Matriz del tiempo de prueba medido por el cronómetro, en min.

2.3 Sistema de caracterización del MVG portátil.

Para caracterizar el MVG portátil desarrollado se construyó un banco que permite su conexión en serie con el MVG patrón de referencia (ver la Figura 2).

La caracterización se realiza en 21 puntos de presión ($j = 1; 2; \dots; J = 21$), desde 6 hasta 10 inH₂O (desde 1 493,04 hasta 2 488,4 Pa), y en cada uno se realizan tres corridas ($i = 1; 2; n = 3$), calculándose el promedio de cada parámetro medido.

El total de mediciones en la caracterización del MVG portátil es $N = 21 \times 3 = 63$.

Las funciones y principales características de los componentes del sistema de caracterización, se describen a continuación de la Figura 2.

Fuente de suministro del fluido de operación.

Según la naturaleza del fluido de operación se utilizan tres fuentes de suministro:

- Aire: comprimido por un compresor y suministrado desde un balasto para mantener el flujo de operación requerido. El aire antes de entrar al sistema de caracterización es filtrado y secado.

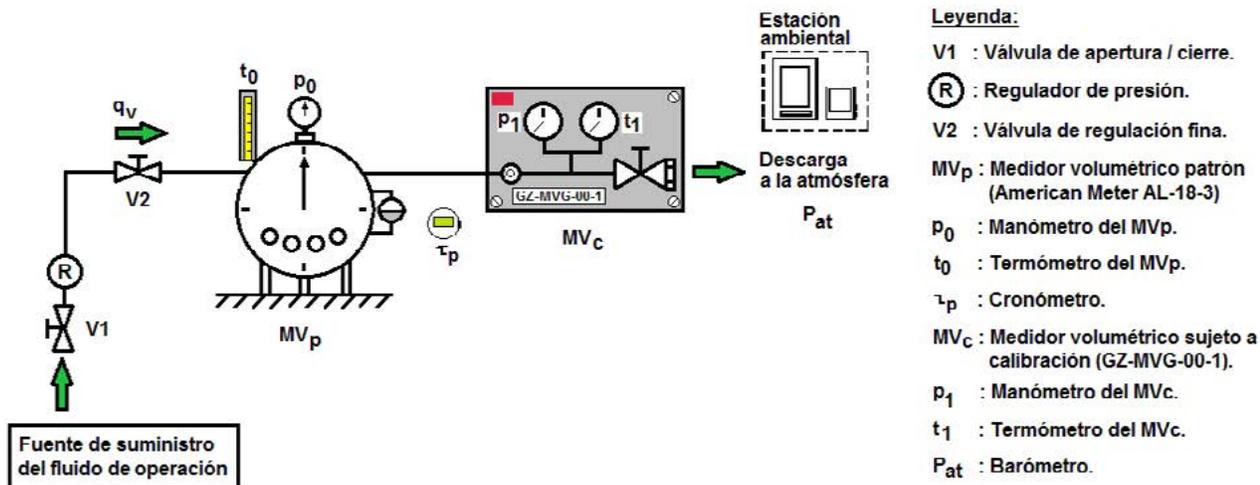


Figura 2. Esquema simplificado del sistema de caracterización del medidor volumétrico de gas.

- b) Nitrógeno: de pureza industrial (> 97 %), está contenido en un cilindro y su extracción se regula con un regulador de alta presión.
- c) Gas natural: suministrado desde las redes de la ciudad. Se considera que la concentración de sus componentes fundamentales se mantiene constante a efectos del presente estudio.

Válvula de apertura / cierre (V1).

Como lo indica su denominación, su función es conectar el sistema de caracterización a la fuente de suministro del fluido de operación, y una vez concluido el proceso o si es necesario por alguna emergencia, desconectarlo.

Regulador de presión.

Las funciones del regulador de presión son:

- a) Reducir la presión de entrada al sistema, considerando la resistencia neumática del MVG patrón de referencia, para reproducir las presiones de entrada al MVG portátil en su rango de operación. Sin embargo, este valor no debe sobrepasar la presión de entrada máxima de operación del MVG patrón de referencia, según su Fabricante.
- b) Mantener constante la presión de entrada al sistema cuando existan fluctuaciones de presión en la fuente de suministro del fluido de operación.

Válvula de regulación fina (V2).

Su función es establecer el flujo volumétrico del

gas de operación ajustando la presión manométrica “aguas arriba” de la restricción del MVG portátil. Su capacidad de regulación debe ser tal que permita colocar la aguja indicadora del manómetro analógico en la posición media del trazo de su escala.

MVG patrón de referencia.

Para la medición del volumen de gas se utilizó como patrón de referencia [ver 5.6-2] un medidor volumétrico de gas de cámara húmeda. Sus principales características metrológicas se refieren en la Tabla 2.

Valor de división/ apreciación	Rango de medición, (L/min)		Error máximo permitido
10 mL 1/2	0,2	< 2	± 1%
	≥ 2	≤ 6	± 0,5 %
	> 6	≤ 8	± 1 %

Tabla 2. Características metrológicas del MVG patrón de referencia.

El MVG patrón de referencia se ha calibrado en dos ocasiones en el Laboratorio Carl Poe Co., Inc., utilizando como patrón de referencia una campana volumétrica American Bell Prover n/s 277. La deriva máxima asociada se reporta en la Tabla 3.

Fecha de Calibración	Trazabilidad	Deriva máxima (Δ _{der} ^{MAX})
2011-05-10	NIST 12169734	0,071 % / año
2014-03-06	NIST 11200311	

Tabla 3. Deriva máxima del error relativo en volumen del MVG patrón de referencia.

Actualmente el período asignado entre calibraciones externas es de dos años.

Cronómetro.

Para medir el tiempo de prueba se utilizó un cronómetro digital. Sus principales características metrológicas se refieren en la Tabla 4.

Rango de medición: hasta	Resolución	Error máximo permitido
9h 59min 59s 99cs	1 cs	± 0,002 %

Tabla 4. Características metrológicas del cronómetro digital.

El cronómetro digital se calibra anualmente por comparación con un contador de pulsos de una señal sinusoidal generada por una fuente regulable de alta exactitud.

2.4. Evaluación de la exactitud del MVG portátil.

Una vez caracterizado, se evalúa su exactitud por comparación con el MVG patrón de referencia según la ecuación (10):

$$er_v = 100 \times \left(\frac{\hat{V}_c}{V_{p_{c1}}} - 1 \right) \quad (10)$$

Donde:

er_v : Error relativo en volumen, en %.

\hat{V}_c : Volumen de gas medido por el MVG portátil calibrado según la ecuación 9, en L.

$V_{p_{c1}}$: Volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia pero corregido a las condiciones de operación del MVG portátil calibrado (P_1 y T_1).

Como la sobrepresión del gas de operación es muy baja ($\Delta p_{max}=12,0 \text{ inH}_2\text{O}$), la calibración ocurre prácticamente a presión atmosférica, por lo tanto, puede considerarse como aceptable que el efecto del factor de compresibilidad en el comportamiento del gas es despreciable, es decir, $Z=1,000$ [11].

Bajo estas circunstancias, el gas puede ser tratado como ideal, y para comparar los volúmenes de gas medidos en diferentes estados termodinámicos, se utiliza la ecuación de Clapeyron [11]:

Donde:

$$V_{p_{c1}} = V_{p_{c0}} \times FCP \times FCT \quad (11)$$

FCT y FCP : Factores de corrección por temperatura y presión respectivamente, adimensionales.

El factor de corrección por presión se calcula según la ecuación (12):

$$FCP = \frac{P_0}{P_1} = \frac{p_0 + P_{at}}{p_1 + P_{at}} \quad (12)$$

Donde:

P_0 y P_1 : Presiones manométricas del gas medidas por los manómetros de los MV patrón de referencia y calibrado respectivamente, en inH₂O.

P_{at} : Presión atmosférica en el momento de la medición, en inH₂O.

P_0 y P_1 : Presiones absolutas del gas, en inH₂O. El factor de corrección por temperatura se calcula según la ecuación (13):

$$FCT = \frac{T_1}{T_0} = \frac{273,15 + t_1}{273,15 + t_0} \quad (13)$$

Donde:

t_0 y t_1 : Temperaturas del gas medidas por los termómetros de los MV patrón de referencia y calibrado respectivamente, en °C.

T_0 y T_1 : Temperaturas absolutas, en K.

2.5 Estimación de la precisión del procedimiento de calibración.

Para evaluar la precisión de la calibración del MVG portátil en diferentes gases, se construyó el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, y se diseñó un experimento anidado compensado en tres niveles para cada gas de operación [12]:

Nivel 1. Presión manométrica "aguas arriba" de la restricción ($i = 1; 2; \dots; p = 9$).

Nivel 2. Temperatura del gas "aguas arriba" de la restricción ($j = 1; 2; q = 3$).

Nivel 3. Resultados de las mediciones del error relativo en volumen ($k = 1; 2; n = 3$).

La variable aleatoria continua analizada es representada como $(er_v)_{ijk}$

En el caso del gas natural, como no se controló su temperatura, el nivel 2 corresponde al factor "estabilidad de la composición del gas natural".

2.6 Procesamiento de las mediciones.

Las mediciones de la variable de salida (error relativo en volumen) se organizan en forma matricial y se evalúa el cumplimiento de los siguientes supuestos teóricos:

- La concordancia de la distribución experimental de la variable medida (er_V) con la distribución de probabilidades normal propuesta.
- La homogeneidad de varianzas de las series de mediciones de (er_V) (homocedasticidad) según Bartlett [13].

Si se cumplen los supuestos anteriores, se evalúan estadísticamente los valores incompatibles (en inglés outliers) aplicando consecutivamente las pruebas de Cochran y Grubbs [12].

Si se confirma la presencia de un “outlier”, se analizan las causas que lo originan y se toman las acciones correctivas y/o preventivas, según sea el caso.

Para evaluar el efecto de cada uno de los factores referidos así como su interacción estadística, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) [12].

En función de los resultados del ANOVA se estiman el gran promedio (\bar{er}_V) y sus desviaciones estándares por repetibilidad [$s_r(er_V)$], por interacción con los factores analizados [$s_{I(t_1)}(er_V)$] y por reproducibilidad [$s_R(er_V)$] [12].

3. RESULTADOS.

Las mediciones se realizaron en la ciudad de Barranquilla, Colombia, en el período desde el 3 de abril hasta el 27 de mayo del 2014. El comportamiento promedio ambiental en ese período se refiere en la Tabla 5.

Demostrada la concordancia del comportamiento experimental de los residuos con el normal esperado, solo se detectó un valor estadísticamente incompatible en la matriz correspondiente al fluido de

	$t_a \pm \Delta t_a$	$HR \pm \Delta HR$	$P_{at} \pm \Delta P_{at}$
Gas	°C	%	hPa
Aire	23,8 ± 3,1	48,9 ± 6,5	1 012 ± 2
Nitrógeno	23,9 ± 3,0	48,1 ± 6,8	1 012 ± 2
Gas natural	30,8 ± 0,7	48,1 ± 6,8	1 016 ± 0,0

Tabla 5. Variables ambientales durante la ejecución de los experimentos.

operación aire: (er_V)₅₂₂ = -0,867%. La causa fue un error de digitación en el valor de la medición de temperatura: (t_1)₅₂₂ = 23,0 °C por (t_1)₅₂₂ = 23,3 °C; al corregirse, la medición fue aceptada (er_V)₅₂₂ = -0,768%.

Demostrada la homocedasticidad de las series de mediciones del error relativo en volumen ($\alpha = 5\%$), en la Tabla 6 se refieren los resultados del ANOVA en función de la naturaleza del fluido de operación ($\alpha = 5\%$).

Los parámetros mancomunados que definen la precisión de la calibración del MVG portátil desarrollado se muestran en la Tabla 7.

Fluido	\bar{er}_V	$s_r(er_V)$	$s_{I(t_1)}(er_V)$	$s_R(er_V)$
Aire	-0,476%	0,016%	0,488%	0,528%
Nitrógeno	-0,445%	0,023%	0,352%	0,385%
Gas natural	-0,151%	0,015%	0,448%	0,605%

Tabla 7. Resultados de la evaluación de la precisión de la calibración del MVG portátil.

En la Figura 3 se muestra a través de una carta de control Sheward [14], el desempeño metrológico mancomunado del prototipo GZ-MVG-00-1 B14 según el gas de operación, en los diferentes niveles de presión manométrica y temperatura “aguas arriba” de la restricción a los que se evaluó.

Para establecer los criterios de control estadístico de la calibración del MVG portátil, se definieron los siguientes límites:

Límites de Advertencia (LA), dentro de los cuales se considera que la variable evaluada (er_V) se encuentra muy probablemente cuando el proceso está bajo control estadístico.

	Aire	Nitrógeno	Gas natural	Grados de libertad		Estadística Crítica
Fuente de variación	F_c	F_c	F_c	$u_1 = p - 1$	$u_2 = p$	$F_{(1-\alpha)}(u_1, u_2)$
Factor 0 (p_1)	159,1	43,2	777,6	8	9	2,51
Factor 1 (t_1)	930,9	225,4	949,2			2,46

Tabla 6. Resultados del ANOVA ($\alpha = 5\%$) en función del fluido de operación.

Se estiman según la ecuación (14):

$$LA = \pm 2 \times s_R(er_V) \quad (14)$$

Límites de Acción (LC), definen la franja en la que, si la variable evaluada (er_V) se encuentra, deben tomarse acciones correctivas o preventivas, para retornar el proceso al estado de control estadístico. Se estiman según la ecuación (15):

$$LC = \pm 3 \times s_R(er_V) \quad (15)$$

Nota 2. Con fines ilustrativos, los valores de los límites referidos en la Figura 3 corresponden al gas natural, que son las máximos.

Entre los límites de Advertencia Superior (LAS) e Inferior (LAI) [14] se espera que se encuentran los resultados de cualquier calibración futura del MVG portátil desarrollado, siempre que se realice en el período asignado entre calibraciones externas del MVG patrón de referencia utilizado (ver Tablas 2 y 3).

Si la deriva del MVG patrón de referencia es mayor que la esperada, es probable que los nuevos resultados de las calibraciones se encuentren en la franja comprendida entre los límites de advertencia (LA) y de acción (LC) [14]; en este caso, el Laboratorio de calibración debe revisar el período asignado entre calibraciones externas del MV patrón utilizado.

4. DISCUSIÓN.

Para los diferentes gases de operación, los resultados del ANOVA (ver Tabla 6) confirman que el efecto de la presión manométrica y la temperatura del gas "aguas arriba" de la restricción del instrumento de medición es significativo estadísticamente en su calibración para $\alpha = 5\%$.

La Tabla 8 muestra la comparación del rango promedio del error relativo en volumen, obtenida experimentalmente en cada j-ésima serie de medición con respecto a la repetibilidad obtenida.

Gas de Operación	er_V	$W(er_V)$	$S_r(er_V)$
Aire	-0,476%	0,014%	0,016%
Nitrógeno	-0,445%	0,019%	0,023%
Gas Natural	-0,151%	0,013%	0,015%

Tabla 8. Comparación entre el rango promedio y la repetibilidad del er_V

En general, el rango promedio de las j-ésimas series de mediciones subestima la repetibilidad de la calibración, que es de naturaleza mancomunada, y la razón es el número pequeño de repeticiones ($n = 3$) en comparación con el gran número de mediciones involucradas en el diseño experimental ($9 \times 3 = 27$).

Los valores de la repetibilidad del error relativo en volumen no dependen prácticamente de la naturaleza del fluido, y la razón está en la destreza y habilidad del Metrólogo en la ejecución de los

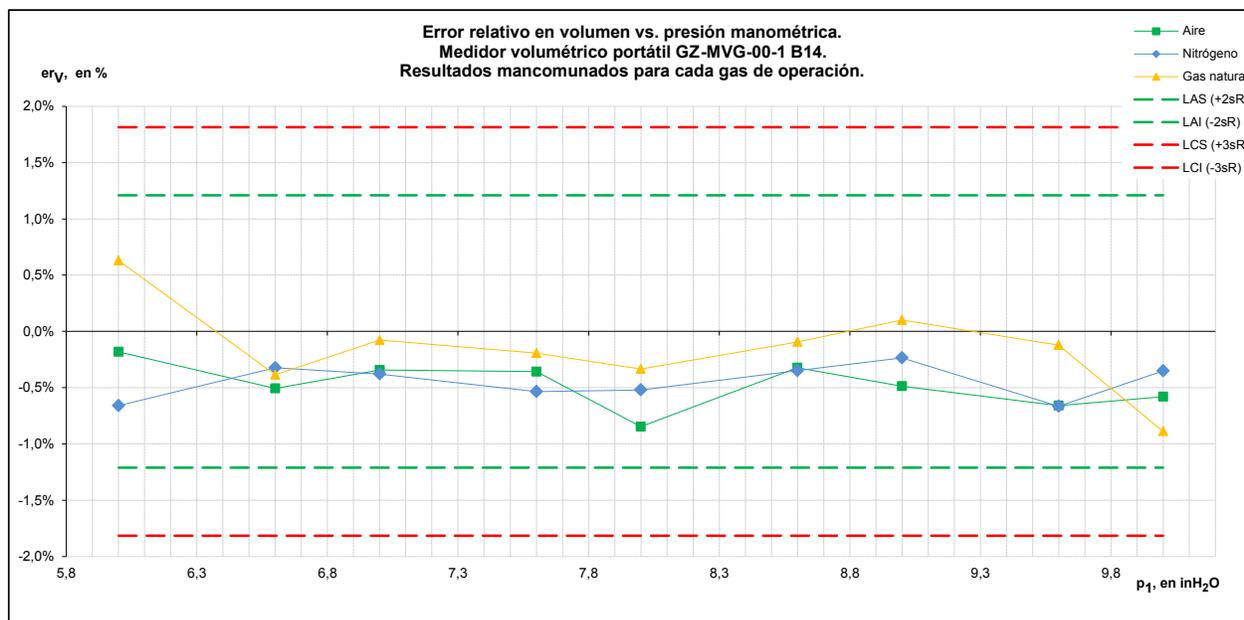


Figura 3. Desempeño metrológico del MVG portátil desarrollado según el gas de operación.

procesos asociados a la caracterización del MVG portátil desarrollado, especialmente la sincronización de acción entre su válvula y el cronómetro.

Sin embargo, su reproducibilidad si depende de la naturaleza del fluido, siendo los casos extremos el nitrógeno, de composición constante y seco, y el gas natural, de composición variable. Por esta razón los resultados son referidos para cada tipo de gas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Considerando el efecto de la temperatura del gas de operación (ver Tabla 6. ANOVA), el Laboratorio de calibración debe controlar no tanto el valor de la temperatura del aire ambiental sino su estabilidad durante la caracterización del MVG portátil.

El rango estadístico del error relativo en volumen $[w(er_V)]$ constituye un buen indicador para aceptar o rechazar una serie de mediciones antes de su procesamiento, contribuyendo a la eficiencia de la proceso de caracterización.

Si la repetibilidad de las j-ésimas series corridas experimentales, estimadas a partir del rango estadístico, es menor que la repetibilidad mancomunada, es decir:

$$w(er_V j) \leq s_r(er_V) \quad (16)$$

Entonces la reproducibilidad mancomunada podría sustituir la estimación de la incertidumbre estándar combinada del error relativo en volumen según GUM [10], es decir:

$$u_c(er_V) = [s_R^2(er_V) + u^2(\Delta er_{der})]^{0,5} \quad (17)$$

Donde:

$u(\Delta er_p)$: Incertidumbre estándar por la deriva de los resultados de la calibración del MVG patrón de referencia, en %.

Nota 3. Si no se cumple la desigualdad (16), el proceso de caracterización debe repetirse, después de analizar las posibles causas del incumplimiento y tomar las correspondientes acciones correctivas o preventivas.

Considerando la reciente calibración del MVG patrón de referencia y el período breve de ejecución del experimento, el efecto de la deriva puede ser despreciada actualmente, por lo tanto:

$$u_c(er_V) = s_R(er_V) \quad (18)$$

Sin embargo, es un hecho que su efecto hará que la reproducibilidad aumente en el futuro, y esa es la razón de su presencia en la ecuación (17).

Considerando que la distribución de probabilidades de la corrección por deriva del MV patrón de referencia [ver ecuación (8)] es rectangular simétrica [10, 15], entonces su incertidumbre estándar máxima en el período asignado entre calibraciones externas (dos años) se calcula según la ecuación (19) [15]:

$$u_{der}^{MAX}(er_p) = \frac{2 \times \Delta er_{der}^{MAX}}{\sqrt{3}} = 0,082 \% \quad (19)$$

Los resultados de la validación utilizando el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, permiten avalar la utilización del MVG portátil desarrollado como patrón de trabajo, considerando que su aporte máximo en la incertidumbre estándar combinada del error relativo en volumen del medidor de gas de diafragma verificado “in situ” no sobrepasará los valores establecidos en la Tabla 9.

Fluido	$S_R(er_V)$	$u_{DER}^{MAX}(er_p)$	$u_c^{MAX}(er_V)$
Aire	0,528%	0,082%	0,534%
Nitrógeno	0,385%	0,082%	0,394%
Gas natural	0,605%	0,082%	0,611%

Tabla 9. Aporte máximo en incertidumbre estándar del MVG portátil desarrollado.

Si una vez evaluadas las otras fuentes de incertidumbre, la incertidumbre expandida de la calibración del medidor de gas tipo diafragma verificado en campo es mayor que $\pm 1\%$, entonces debe reducirse su error máximo permitido según la ecuación 2, observando el cumplimiento de la desigualdad 3, como establece OIML 137-1&2:2012 [6].

Conscientes de los costos asociados, es recomendable:

1R. Utilizar una fuente de suministro del gas de operación que no sea el gas natural. El uso del nitrógeno es muy recomendable por las siguientes ventajas:

- La fuente portátil de suministro es más sencilla: un cilindro con un regulador de alta presión es suficiente.
- Su alta pureza y estabilidad de composición es asegurada por el Proveedor.
- No es tóxico ni inflamable, y su impacto ambiental es despreciable.

- Genera la mejor reproducibilidad en el desempeño metrológico del MVG portátil (ver Tabla 7).

Si bien el uso del gas natural en la comprobación "in situ" de los medidores de gas tipo diafragma es tentador por ser la opción aparentemente más económica (a corto plazo), no es recomendable porque:

- El MV desarrollado muestra su peor desempeño metrológico en términos de reproducibilidad (ver Tabla 7).
- Su impacto ambiental, especialmente por el efecto invernadero del metano, su principal constituyente, es indeseable.
- Es inflamable.

2R. Automatizar el banco neumático donde se caracterizan y calibra el medidor volumétrico portátil desarrollado.

3R. Continuar los procesos de medición con el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, "alimentando" las matrices de los datos de entrada hasta demostrar la tendencia asintótica de la desviación estándar por reproducibilidad.

En este sentido, debe considerarse que la estimación de la deriva del patrón volumétrico de referencia es complicado [16], y el riesgo de sobrestimación de su incertidumbre estándar es alta, pero es posible realizar una estimación realista si a la matriz de datos se le adicionan periódicamente nuevos resultados experimentales, por ejemplo, cada tres meses, hasta alcanzar el período asignado de calibraciones externas del MV patrón de referencia (dos años).

Esta estrategia recomendada es costosa y requiere del Laboratorio de calibración una gran disciplina en la gestión de la calidad de los procesos de confirmación metrológica y validación de la calibración del MV de gas desarrollado.

4R. Extender el estudio hacia otras regiones del país, por ejemplo, más altas o más frías que Barranquilla.

Agradecimientos.

Los Autores agradecen la valiosa colaboración prestada por los Ingenieros de Gases del Caribe en la solución metrológica presentada.

6. REFERENCIAS.

[1] NTC 5730:2009. Revisión periódica de instalaciones para suministro de gas natural

destinadas a usos residenciales y comerciales y sus correspondientes artefactos a gas. 2009-12-16.

- [2] OIML V 2-200. Edition 2012 (E/F) (JCGM 200:2012). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition 2008 version with minor corrections. (<http://www.oiml.org/publications/V/V002-200-e12.pdf>)
- [3] CRG67-95. Código de Distribución de Gas Combustible por Redes. Comisión de Regulación de Energía y Gas. 1995-12-21.
- [4] IML. International Vocabulary of Terms in Legal Metrology. Edition 2000. (<http://www.oiml.org/publications/V/V001-ef00.pdf>)
- [5] NTC 2728. Medidores de gas tipo diafragma. Primera actualización. 2005.
- [6] OIML R137-1&2. Gas meter. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. Edition 2012 (E).
- [7] NIST Special Publication 811. Guide for the Use of the International System of Units (SI). 2008 Edition (<http://www.bipm.org/en/si/conversions.html>)
- [8] Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia* 27, 3-10 (1990).
- [9] Draper, N. R.; Smith, H. Applied Regression analysis. Second edition. John Wiley & Sons. 1981.
- [10] OIML G1-100 Edition 2008 (E) (JCGM 100:2008). GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition September 2008. 134 pages (<http://www.oiml.org/publications>).
- [11] Dietrich, Harald, "et al". Measuring instruments for gas. Gas Meter Testing of Gas Volume Meters with Air at Atmospheric Pressure. PTB Testing Instructions. Volume 29. 2003.
- [12] ISO 5725-3:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method.
- [13] Engineering Statistics Handbook (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook.htm>)
- [14] ISO 3534-2: 1993 (E/F). Statistics - Vocabulary and symbols. Part 2: Statistical quality control. First edition. 1993-06-01.
- [15] ME-015. Procedimiento para la calibración de caudalímetros de gases. Centro Español de Metrología (CEM). Edición digital 1. (<http://www.cem.es/divulgacion?page=7>)
16. ILAC-G24: 2007 / OIML D 10: 2007 (E). Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments (<http://www.oiml.org/publications>).