

PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CAMPANAS GASOMÉTRICAS MODELOS LJQ-20 Y LJQ-100

PROPOSAL OF A MEASUREMENT PROCEDURE FOR THE CALIBRATION OF BELL PROVERS MODELS LJQ-20 AND LJQ-100

F. J. BUZÓN-GONZÁLEZ^{a†}, A. R. HERNÁNDEZ-LEONARD^b

a) Laboratorio de Volumen, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba; franb@inimet.cu[†].

b) Subdirección de Ciencia e Innovación Tecnológica, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba; alehl@inimet.cu.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 25/05/2020

PACS: Metrology (Metrología), 06.20.-f; Flows in pipes and nozzles (Flujo en tuberías y toberas), 47.27.nf; Spatial dimensions (Dimensiones espaciales), 06.30.Bp; Natural gas (Gas natural), 88.85.mf.

Las campanas gasométricas son patrones de calibración de laboratorio para la unidad de volumen de gas y flujo volumétrico [1].

Las dos campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 que se encuentran en Cuba han sido previamente verificadas en China por el Instituto de Metrología de Zhejiang por el método de encintado con una incertidumbre expandida de 0.4 %.

En Cuba las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 (fabricante Hangzhou TNMA MEasure Technology Co., Ltd.) se utilizan para la verificación de contadores de gas, mediante la comparación del volumen de aire medido por las campanas gasométricas y el registrado con el contador en base a la norma cubana NC-1006:2014 [2].

El logro en Cuba de la calibración de estas campanas gasométricas significaría la sustitución de la importación de este servicio.

I. DESARROLLO

La ISO 4006:1991 [3] define la campana gasométrica como:

Dispositivo de medición volumétrico, utilizado para gases, constituido por un tanque estacionario y un tanque móvil coaxial. El volumen de gas de la cavidad que se encuentra por encima del líquido de sellaje puede ser deducida de la posición del tanque móvil. (Fig. 1)

Para su calibración es necesario determinar su volumen de referencia. Esto se realiza por medio de diferentes métodos de calibración (Fig. 2).

Máquina de medición por coordenadas, rastreador laser o brazo con sensores de distancia: Se emplean los instrumentos mencionados para determinar el diámetro interior de la campana gasométrica. Basándose en estas mediciones se halla el volumen de referencia [4,5].

Encintado (Strapping): Las dimensiones de la campana, el tanque y los niveles del líquido de sellaje son medidos calculándose la capacidad. Como una cinta métrica es pasada alrededor del perímetro de la campana, el procedimiento se le conoce como encintado [6,7].

Embotellado (Bottling): Consiste en transferir un pie cúbico (1 ft³ equivale aproximadamente a 28.32 dm³) de aire entre una botella de pie cúbico o un patrón de pie cúbico portátil y la campana gasométrica [7].

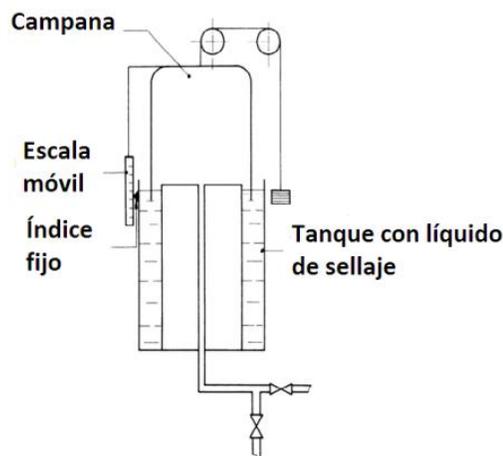


Figura 1. Campana gasométrica.

Desplazamiento: El volumen de la campana gasométrica se determina utilizando un recipiente de referencia. Durante la calibración, el recipiente lleno de aceite es conectado a la salida de la campana gasométrica. Vaciar el recipiente causa que el aire fluya y la campana se desplace una longitud que corresponde al volumen de referencia [1].

Pesaje: Se interconecta un recipiente cerrado a una campana gasométrica. El volumen del aceite que fluye del recipiente es reemplazado por una cantidad igual de aire. El aceite que fluye es pesado y como su densidad es conocida, su volumen

es obtenido a partir del pesaje, determinándose así el volumen de referencia de la campana gasométrica [8].

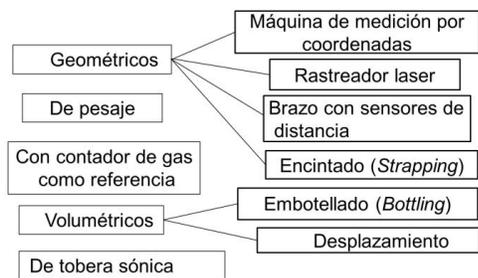


Figura 2. Métodos de calibración de campanas gasométricas.

Con contador de gas como referencia: Consiste en interconectar la campana gasométrica a un contador de gas patrón. El aire desplazado por esta pasa por el contador patrón que permite determinar su volumen de referencia [9].

Tobera sónica: En este dispositivo a medida que la relación de presión aguas arriba a aguas abajo de la tobera se eleva por encima de un valor crítico, la velocidad del gas en la garganta se acelera a la velocidad local del sonido. Un sistema de tobera sónica es conectado a la campana gasométrica. Una bomba de vacío es instalada para forzar el flujo de aire en el sistema. El volumen de aire desplazado por la campana gasométrica es determinado basado en el flujo volumétrico de referencia que pasa por la tobera sónica y el tiempo de medición [1].

BANCOS DE TIPO CAMPANA (GBPM-10) y (GBP-6)

El principio de medición de estos se basa en que el volumen efectivo en la campana gasométrica se utiliza como referencia durante la detección del error de los contadores de gas. Cuando la campana baja, el gas fluye a través de la tubería de conexión al contador. Un codificador eléctrico convierte la altura de caída en una señal de pulsos. El sistema de control convierte la señal de pulsos en el volumen de la campana.

ANÁLISIS SOBRE LOS MÉTODOS PROPUESTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA CAMPANA GASOMÉTRICA

Para calibrar la campana gasométrica dentro de los métodos gasométricos el uso de un rastreador laser presenta la desventaja de requerir un desarme de la instalación de medición donde se corre el riesgo de dañarla al desmontar la campana. La importación del rastreador laser se dificulta pues es altamente costoso (más de \$ 85 000 dólares) y habría que garantizarle la trazabilidad metrológica que para este instrumento de medición aún no se ha alcanzado en Cuba. Lo mismo ocurre si se utiliza la máquina de medición de coordenadas. Respecto al uso del brazo con sensores de distancia, aparte de los problemas mencionados, su uso lleva aparejado el empleo de motores paso a paso, regla óptica, mecanismos de ensamblaje, computadora con programa específicamente diseñado para estas mediciones y micrómetros digitales con interfaz de comunicación (Más información sobre el equipamiento auxiliar ver [5]). Un sistema de medición como este es costoso y hay agregarle los gastos de mantenimiento y calibración. Lo ideal es ejecutar la calibración de la campana con el menor costo y la

mayor calidad posibles, garantizando, además, la soberanía tecnológica. Por lo tanto, no se recomienda el uso de estos instrumentos de medición patrones para calibrar en Cuba las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

Tabla 1. Características de los bancos tipo campana

	(GBPM-10)	(GBP-6)
Flujo	0.016 m ³ /h~1.2 m ³ /h	0.1 m ³ /h~6 m ³ /h
Contadores de gas	G1.6 ~G4	G1.6~G4
Modo de muestreo	Lectura con los mandos inalámbricos	Captura de imágenes en movimiento
Volumen total de la campana LJQ-20	20 L	100 L
Clase	0.5	0.5
Estaciones de detección	10	6

El método de calibración por botella de pie cúbico no ha sido reportado como un método empleado con frecuencia en la actualidad, probablemente por el surgimiento de nuevos métodos. Igualmente sucede con el patrón de pie cúbico de Stillman. Además, las campanas gasométricas trabajan con valores de dm³ o su equivalente en L. Por lo tanto, tampoco se recomienda este método de calibración para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

El método de desplazamiento tiene como inconveniente que consume tiempo debido al escurrimiento de la película de aceite. Por ejemplo, la calibración de una campana gasométrica de 0,2 m³ (200 L) puede tomar entre 2 y 5 días con dos trabajadores. En este tiempo también influye el tamaño de las dosis, que es igual al volumen del recipiente patrón [1]. Por lo tanto, no se recomienda este método para la calibración de las campanas gasométricas de estos modelos.

El método de pesaje al igual que el volumétrico requiere gran cantidad de tiempo, depende mucho de la tecnología y habría que invertir como mínimo en una balanza adecuada, una válvula desviadora, aceite, tanque de almacenamiento, contenedor cerrado, adjuntarle todo esto a ambas campanas y hallar una forma de automatizar el proceso con un programa informático (Más información sobre el equipamiento auxiliar ver [8]). Como se observa esto sería muy costoso y complicado para una calibración que se sugiere hacer una vez cada 2 o 3 años, por lo que no se recomienda.

Para el método de calibración con contador de gas como referencia este tendría que ser calibrado en otro país cada 2 años si solo se utiliza en la calibración de la campana gasométrica, pues al ser más preciso que la propia campana no tendría trazabilidad metrológica en el país. Habría que asegurarse que el contador de gas de referencia adquirido sea compatible por sus dimensiones y funcionamiento con las campanas gasométricas en cuestión y en la primera calibración deberían participar técnicos extranjeros con experiencia en el método, donde se debería esclarecer los detalles de la calibración. Debido a estas desventajas no se recomienda.

Como último método a comentar se encuentra el método de calibración utilizando una tobera sónica como patrón. Aunque es posible hallarle trazabilidad en el país al contador de tiempo y los medidores de presión y temperaturas empleado en esta calibración, de adquirirse la tobera sónica apropiada, no se garantiza en Cuba su trazabilidad metrológica. En Cuba en el 2006 fue posible realizar la calibración de una campana gasométrica de 500 dm³ por tobera de flujo crítico. Fue realizada por especialistas mexicanos quienes trajeron consigo todos los patrones, quedando la campana gasométrica trazable a patrones mexicanos como toberas de flujo crítico, medidores de tiempo, presión y temperatura. Por lo tanto se recomienda emplear otro procedimiento de medición para calibrar las campanas gasométricas que pueda ser llevado a cabo en Cuba por especialistas del país y que logre la trazabilidad metrológica en este como el procedimiento de medición basado en el método de encintado.

PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CAMPANAS GASOMÉTRICAS

Método de encintado (Fig. 3).

Ventajas

1. Las desviaciones de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura no afectan la calidad de las mediciones (siempre y cuando se mantengan en los límites previstos).
2. No requiere de un desarme completo de la campana si se usa una cinta de diámetro como instrumento patrón.
3. No requiere de la importación de todos los patrones pues algunos ya se encuentran en el INIMET y la trazabilidad metrológica de los instrumentos empleados puede ser lograda en Cuba. Se emplearía un pie de rey ((0 a 200) mm, Resolución = 0,05 mm) para medir las dimensiones de la escala. Una regla metálica ((0 a 300) mm, Resolución = 1 mm) para medir la distancia entre la campana y el tanque. También para determinar la variación del nivel de aceite en la campana gasométrica modelo LJQ-100 pues esta posee un visor diseñado para esto. La campana gasométrica modelo LJQ-20 no presenta este visor por lo que se utilizaría un micrómetro de profundidad ((0 a 300) mm, Resolución = 0,01 mm) para la medición. Por último se emplearían dos cintas de diámetro ((200 a 330) mm y (300 a 620) mm, Resolución = 0,05 mm) para determinar el diámetro exterior de cada campana gasométrica.
4. La incertidumbre de calibración puede ser cercana a 0,3 %, que es un valor aceptable para el servicio que realizan las campanas gasométricas de este modelo en Cuba.

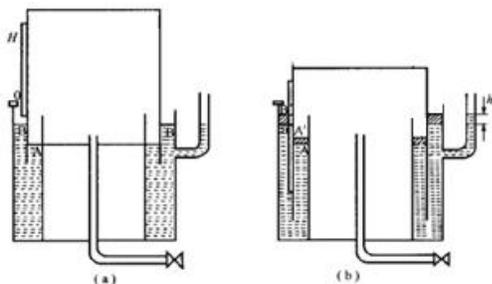


Figura 3. Corte transversal a la campana gasométrica durante el método de encintado a) Posición cero b) Posición final.

El modelo matemático en este caso sería a temperatura ambiente de (20±5) °C:

$$V = \frac{\pi}{4}(\bar{d}^2)\bar{H} + \bar{H}eB - \frac{\pi}{4}[D^2 - (\bar{d}^2)]\bar{h} + \delta V \quad (1)$$

donde V es el volumen de la campana gasométrica, en dm³; \bar{d} es el diámetro promedio, en dm; \bar{H} es la altura promedio de la campana gasométrica, en dm; e es el espesor de la placa de escala, en dm; B es el ancho de la placa de escala, en dm; D es el diámetro interno del canal, en dm; \bar{h} es la diferencia de altura en el nivel de líquido luego del descenso de la campana gasométrica, en dm y δV es una fuente de incertidumbre que representa el cambio en el volumen del gas debido a la adherencia de la película de aceite a las paredes de la campana. La adherencia de la película de aceite es esencialmente la misma en el interior y el exterior de la pared de la campana. Sin embargo, si las áreas internas y externas de la superficie del aceite son lo suficientemente diferentes, las dos disminuciones del nivel de aceite pueden ser contradictorias con la diferencia de presión entre la campana y la atmósfera. Una transferencia de aceite ocurre entre el interior y el exterior de la campana para equilibrar esta inconsistencia, y se produce un error sistemático. El cambio en el volumen del gas provocado por las películas de aceite puede arrojar un margen de error relativo al volumen de la campana gasométrica de hasta -0,013 %. Quiere decir que hay un menor volumen de gas de lo que es explicado por cálculos que incluyen solo las dimensiones de la campana y el cambio en el nivel de aceite debido a la inmersión de la campana [6]. Esta cantidad se considerará en el cálculo de la componente de incertidumbre debida a la adherencia de la película de aceite.

Con anterioridad a las mediciones geométricas del procedimiento de medición se habrá desmontado la escala milimetrada que indica la altura de la campana para su calibración en un laboratorio metrológico. Se recomienda mantener la calibración periódica de los sensores de presión, humedad relativa, temperatura. Esto último es independiente del método de calibración escogido para calibrar la campana gasométrica y debe realizarse siempre que no halla peligro de dañar estos sensores o el funcionamiento de la campana gasométrica en sí. La calibración y el trabajo con las campanas gasométricas se realiza bajo límites previstos de estas magnitudes. La literatura no reporta que este método de calibración sea fuertemente afectado por estas magnitudes, aunque en el caso de la presión dentro de la campana se debe garantizar que sea la misma en cualquier posición de esta. También se recomienda calibrar el sensor de tiempo de las campanas gasométricas si se aspira hacer de ellas un patrón de flujo de gas aunque en la actualidad funcionan como patrón de volumen de gas.

Para el certificado de calibración se entregaría principalmente el valor del volumen calculado de la campana gasométrica, su incertidumbre expandida el valor del factor K (pulsos/L) con su incertidumbre.

La incertidumbre expandida de medición se expresa como la incertidumbre combinada de medición multiplicada por el factor de cobertura $k = 2$, la que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95 %. (Fig. 4 y Tabla 2).

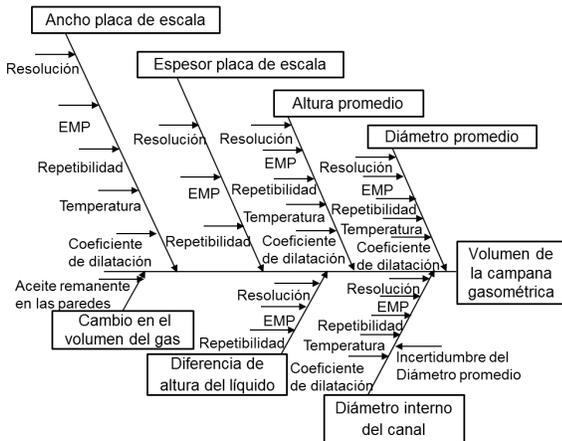


Figura 4. Diagrama de causa y efecto de las diferentes variables que influyen en la estimación de la incertidumbre del volumen de la campana gasométrica.

Para la determinación de las componentes de incertidumbre se tendrán en cuenta:

- la resolución de cada instrumento,
- el error máximo permitido (EMP) de cada instrumento,
- la repetibilidad de las mediciones,
- el coeficiente de dilatación térmica,
- la variación de la temperatura del local y diferencias de temperatura entre el instrumento y el mensurando,
- el cambio en el volumen del gas por adherencia de la capa de aceite.

La Tabla 2 se construye a partir de valores que se esperan para un procedimiento de medición como el propuesto teniendo en cuenta las dimensiones de la campana gasométrica LJQ-100, los instrumentos de medición propuestos, el modelo matemático, la Fig. 4 y el documento JCGM 100:2008 [10].

Desventajas

1. Pueden ocurrir errores en las mediciones de encintado debido a una desalineación de la cinta en los perímetros de la campana.
2. La campana debe tener una sección transversal cercana a un círculo verdadero ya que los cálculos dependen de relaciones entre diámetros de círculos y diámetros y alturas de cilindros. Sin embargo la producción de una campana con una sección transversal verdaderamente circular no es difícil con los métodos modernos de fabricación.
3. No incluye automáticamente los efectos de abolladuras o deformaciones significativas en la campana.
4. La cantidad de datos registrados es mayor que otros métodos.

Tabla 2. Presupuesto de incertidumbre para el volumen de la campana gasométrica de 100 dm³.

	Nombre de la Componente	$u(x_i)$	$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	Contribucion (dm ³) $u_i(V)= c_i u(x_i)$
u_d	Diámetro promedio	0.002	57.8	0.13
u_H	Altura promedio	0.009	10.0	0.09
u_e	Espesor de la placa de escala	0.0007	4.0	0.0029
u_B	Ancho de la placa de escala	0.0007	0.2	0.00014
u_D	Diámetro interno del canal	0.018	-1.9	0.034
u_h	Diferencia de altura de nivel de líquido	0.009	-2.4	0.021
$u_{\delta V}$	Adherencia de la película de aceite	0.008	1	0.008
u_c	Incertidumbre combinada			0.16
U	Incertidumbre expandida (k=2)			0.3
U_{rel}	Incertidumbre expandida relativa			0.3 %

II. CONCLUSIONES

Por las razones y ventajas antes expuestas se propone la implementación en Cuba de este procedimiento de medición basado en el método de encintado para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100. Estas campanas gasométricas llevan a cabo la verificación inicial de contadores de gas de diafragma de clase 1,5 cuyos errores deben ser inferiores a $\pm 1.5\%$ a Q_{max} (Flujo máximo) y $0,2Q_{max}$ y a $\pm 3\%$ a Q_{min} (Flujo mínimo) por lo que siguiendo el criterio de la norma OIML R 137-1&2: 2012 [11], la incertidumbre expandida de esta verificación debe ser menor que un tercio del EMP (EMP: Error máximo permitido). Con el propósito de asegurar una incertidumbre expandida de la verificación inicial con este valor, la incertidumbre expandida de calibración de la campana gasométrica, una de las componentes de la incertidumbre expandida de la verificación inicial, debe ser menor de 0,5 %. La incertidumbre expandida relativa de calibración de este procedimiento de medición cumpliría este criterio, por lo que la misma es aceptable para el servicio que realizan las campanas gasométricas de este modelo en Cuba hoy en día. Aunque este procedimiento de medición se realizaría por primera vez en nuestro país a campanas gasométricas de este modelo, previamente estas han sido verificadas en China por el Instituto de Metrología de Zhejiang por el método de encintado con una incertidumbre expandida relativa de 0.4 %. La calibración en Cuba de estas campanas gasométricas por este procedimiento de medición significaría la sustitución de la importación este servicio y por lo tanto un ahorro económico para el país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Szewczyk et al., *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*, (Springer, Switzerland, 2020), pp. 172-177.
- [2] NC 1006: 2014 "Contadores de gas de diafragma hasta 16 m³/h – Métodos y equipos de verificación".
- [3] ISO 4006:1991 "Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and Symbols".
- [4] Yu. V. Kuzmenko, A. N. Samoilenko, *Ukrainian Metr. J.* **1**, (2015).
- [5] M. Benkova, S. Makovnik, I. Mikulecky, V. Zamecnik, *J. Metr. Soc. Ind.* **26**, 3, (2011).
- [6] J.D. Wright y G.E. Mattingly, *National Institute of Standards and Technology Special Publication* **250**, 49, (1998).
- [7] S. Hasco, *Examination of Vapor-Measuring Devices for Liquefied Petroleum Gas*, (NBS Handbook 117, Washington, D.C., 1975), pp. 1-18.
- [8] B. Pavlovic, H. Kozmar and M. Šunić, *Strojarstvo* **50**, (2008) (www.semanticscholar.org/paper/Advances-in-gas-flow-measurement-using-weighing-Pavlovic-Kozmar/).
- [9] J. Tonkonogij, A. Stankevicius, A. Bertasiene y A. Tonkonogovas, en *17th International Congress of Metrology*, (EDP Sciences, France, 2015).
- [10] JCGM 100:2008 "Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement".
- [11] OIML R 137-1&2:2012, "Gas meters, Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

