

CALIBRACIÓN DE CAMPANAS GASOMÉTRICAS

Autores: M.Sc. Fran Javier Buzón González, Investigador Agregado¹

M.Sc. Alejandra Regla Hernández Leonard, Investigadora Auxiliar²

¹Laboratorio de Temperatura, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba. franb@inimet.cu , <https://orcid.org/0000-0001-5157-8564>

²Subdirección de Ciencia e Innovación Tecnológica, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba. alehl@inimet.cu , <https://orcid.org/0000-0002-7484-376X>

RESUMEN

El artículo tiene como objetivo dar a conocer la importancia del uso de las campanas gasométricas, los métodos tradicionales y más recientes de calibración, así como la función que tienen en Cuba y en el mundo. Para ello fueron consultados publicaciones originales de estudios científicos, normas internacionales y, además, se realizaron visitas al Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas (Unión Cuba-Petróleo), donde se utilizan varias campanas gasométricas. Este tema resulta de interés debido al surgimiento de nuevos métodos de calibración de campanas gasométricas en los últimos veinte años y su uso mantenido como patrón de referencia desde principios del siglo pasado hasta el presente.

PALABRAS CLAVE: metrología; patrones, calibración; campanas gasométricas; flujo en tuberías y toberas; dimensiones espaciales, gas natural

ABSTRACT

The article, aims to show the importance of the use of bell provers, their traditional and more recent calibration methods, as well as the function they have in Cuba and in the world. For this, original publications of scientific studies and international standards were consulted. Besides, visits were made to the Verification Laboratory of Gas Meters (Cuba-Petroleum Union) where several bells provers are used. This topic is interesting mainly because of the emergence of new bell prover calibration techniques in the last twenty years and their use as a reference standard since the beginning of the last century to nowadays.

KEY WORDS: metrology; standards and calibration; bell provers; flows in pipes and nozzles; spatial dimensions, natural gas

INTRODUCCIÓN

Actualmente las mediciones de volumen y flujo de gas natural se realizan, principalmente, con medidores de diferentes principios de medición dígase: desplazamiento positivo (medidores tipo diafragma y tipo rotativo), turbina, por

ultrasonido, o por presión diferencial.

Entre los patrones primarios que son reconocidos por la comunidad internacional como referencia para la calibración de medidores de volumen y flujo de gas está presente la campana gasométrica (Figura 1).

Comúnmente halladas en instalaciones de calibración, transfieren la unidad de volumen de gas y de flujo volumétrico [1]. Esto puede observarse en la Figura 2. [2]

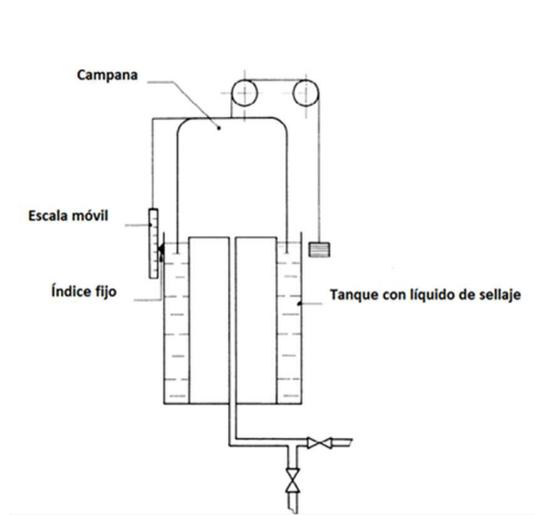


Figura 1. Campana gasométrica

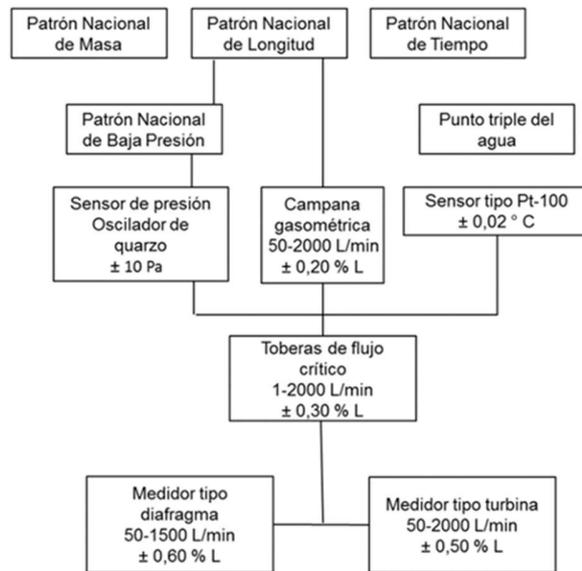


Figura 2. Ejemplo de esquema de trazabilidad para las mediciones de volumen y flujo hasta 2000 L/min

Esta viene utilizándose desde principios del siglo 20 como patrón de referencia y con frecuencia el gas que utiliza es aire. El líquido sellante es generalmente aceite a baja presión de vapor.

En Cuba las campanas gasométricas se utilizan con frecuencia en la verificación de contadores de gas, mediante la comparación del volumen de aire medido por las campanas gasométricas y el registrado en el contador en base a la norma cubana NC-1006:2014 [3].

DESARROLLO

Tradicionalmente para calibrar la campana gasométrica ha sido necesario determinar su volumen. Este ha sido medido ya sea por transferencia directa de volúmenes de aire conocidos de botellas calibradas (calibración por botella de pie

cúbico) o por métodos que involucran mediciones dimensionales directas de la campana gasométrica utilizando una cinta de medición que, con frecuencia, consiste en una cinta de acero diseñada para medir el diámetro exterior (calibración por encintado).

El primer procedimiento descrito en una publicación de Buró Nacional de Patrones (EU) en 1926, aparentemente se volvió tan tradicional que por largo tiempo no se prestó mucha atención a la posibilidad de encontrar otros y, quizás para algunos, mejores métodos. [4]

Una botella de níquel o de cobre previamente calibrada recubierta en cromo se abre al final de su cuello inferior y se baja a un tanque con un líquido sellante, usualmente aceite ligero de baja presión de vapor (Figura 3). Mientras el líquido entra por el fondo y llena el interior hasta la marca de graduación en el vidrio indicador en el cuello superior de la botella, un volumen de aire se desplaza y fluye a través de un tubo conector a la campana gasométrica que se eleva.

Frecuentemente se utilizó también otro dispositivo similar llamado "Patrón de pie cúbico de Stillman". Su creador fue M. H. Stillman. Consistía en una campana gasométrica transportable que se eleva y desciende en un tanque anular. La campana gasométrica es guiada por una columna central vertical que se desliza en un cilindro cerrado, y su movimiento hacia arriba está limitado por un tope ajustable. Este patrón, tan exacto como una botella de pie cúbico, ofrecía la ventaja adicional de ser fácilmente transportable.



Figura 3. Botella de inmersión 1ft³

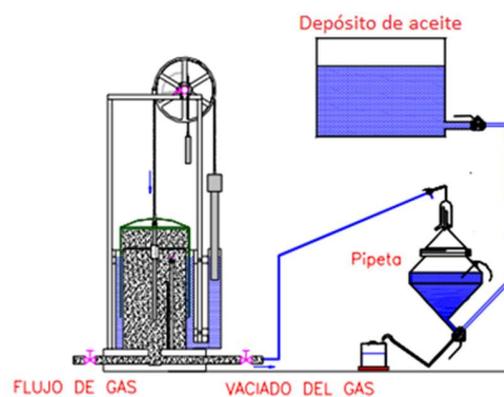


Figura 4. Arreglo de calibración de la campana FTBP-05

Por otra parte, el procedimiento preferido en el NIST, hasta el año 1998, consistía en "encintar" la campana gasométrica para obtener el volumen exterior a través del diámetro promedio y obtener el volumen interno sustrayendo el volumen del metal en la pared de la campana. [5]

Con el decursar del tiempo han surgido métodos alternativos de calibración de las campanas gasométricas ejemplificados a continuación.

Método de desplazamiento para la calibración de la campana gasométrica

En el año 2004 la exactitud en las mediciones de flujo volumétrico de gas en México era diseminada a través de la operación de tres patrones nacionales de desplazamiento positivo; uno de ellos fue el patrón nacional de flujo de gas tipo campana modelo FTBP-05 con un volumen de desplazamiento de aproximadamente 0,14 m³. [6]

En el patrón nacional de flujo de gas FTBP-05 el desplazamiento vertical de la campana gasométrica era medido a través de un *encoder* rotatorio (dispositivo de generación de pulsos) con una resolución de 5 000 pulsos por revolución.

La calibración de este patrón se refirió básicamente a la determinación del factor de calibración K, que relaciona cada pulso emitido por el *encoder* con el volumen desplazado. Así, existe una constante de proporcionalidad entre el volumen desplazado y la cantidad de pulsos emitidos por el *encoder* durante dicho desplazamiento.

Para la obtención de la constante de calibración K se emplea la técnica de desplazamiento de agua (del inglés, *water draw*) donde se utiliza una pipeta volumétrica. Este método volumétrico utiliza un recipiente auxiliar (pipeta) que se interconecta con la campana; el arreglo de interconexión se diseñó con la finalidad de que las diferencias de presión entre la campana y el recipiente auxiliar sean despreciables (Figura 4). La calibración de la pipeta volumétrica se realizó bajo las mismas condiciones de uso que prevalecerían en la calibración de la campana (incluido el tipo de aceite). Dicha calibración se realizó por el método gravimétrico, aplicando el método de doble sustitución en las mediciones de masa, lográndose de esta manera trazabilidad al Patrón Nacional de masa.

Al desalojar el aceite del recipiente auxiliar este volumen es ocupado por el gas proveniente de la campana gasométrica. Conocido el volumen desplazado, resta entonces relacionarlo con el número de pulsos generados por el *encoder* durante este desplazamiento para calcular la constante K.

Finalmente, el modelo matemático usado para calcular K, a partir de las mediciones de volumen en el recipiente auxiliar resultó:

$$K = \frac{C}{V_P \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_C \cdot (T_C - 20))} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$V_P = V_{20} \cdot (1 + \alpha_P \cdot (T_P - 20)) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

C [pulsos]: Número de pulsos generados

V_P [L]: Volumen de la pipeta a la temperatura cuando está vacía después de realizar la prueba

α_C [1/°C]: Coeficiente lineal de expansión térmica del material de fabricación de la campana

T_C [°C]: Temperatura en la campana

V_{20} [L]: Volumen de la pipeta a 20 °C

α_P [1/°C]: Coeficiente cúbico de expansión térmica del material de fabricación de la pipeta

T_P [°C]: Temperatura de la pipeta vacía

En Cuba se reporta la utilización de este método para la calibración de una campana gasométrica en [7]. En este caso, la campana gasométrica se calibra con un recipiente metálico (clessidra) con una capacidad nominal de 50 dm³ con error máximo permisible $\pm 0,025$ % de su capacidad. Este método continúa empleándose en nuestro país.

Calibración utilizando una tobera de flujo crítico

Una tobera sónica es un medidor de flujo convergente-divergente. En estos dispositivos existe una correlación entre el caudal másico y la presión diferencial a través de la restricción (área mínima). Si la velocidad del fluido alcanza el valor de la velocidad sónica en la zona de área mínima, entonces al medidor se le conoce como "medidor crítico".

Una vez que las toberas han sido calibradas y se usan como patrón, el caudal másico de aire que pasa a través de ella se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$q_{m_{tob}} = \frac{\pi \cdot d_g^2 \cdot C^* \cdot C_d \cdot p_o}{4 \cdot \sqrt{\frac{R}{M_a \cdot \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a}\right)\right]} T_o}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$q_{m_{tob}}$ [kg/s]: es el caudal másico en la tobera,

d_g [m]: es el diámetro de garganta de la tobera.

C^* : es la función de flujo crítico

C_d : corresponde al coeficiente de descarga en la tobera,

p_o [Pa]: es la presión de estancamiento,

R [J/mol/K]: es la constante universal de los gases,

M_a [kg/mol]: es la masa molar del aire seco,

x_v : es la fracción molar del vapor de agua,

M_v [kg/mol]: es la masa molar del agua,

Re : es el número de Reynolds y

T_0 [K]: es la temperatura de estancamiento

En Cuba se ha utilizado una tobera de flujo crítico por especialistas del CENAM (Centro Nacional de Metrología, México) para la calibración del volumen de la campana gasométrica SAMGAS, modelo 500 dm³ ubicada en el Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET (Unión Cuba-Petróleo), Provincia Habana (Figura 5). El resultado de la calibración puede observarse en la Tabla 1.

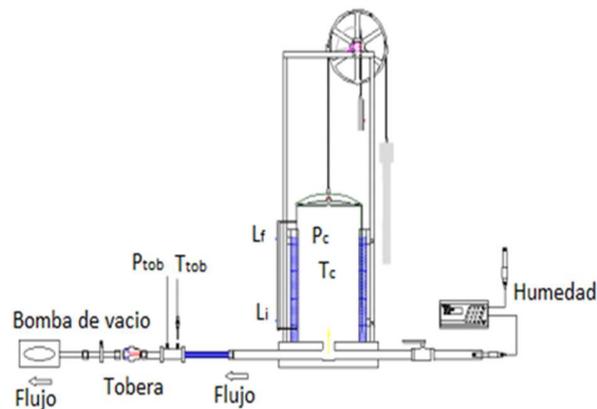


Figura 5. Instalación de la tobera de flujo crítico

Tabla 1 Resultado de calibración del medidor para la calibración del volumen de la campana de gas tipo campana marca SAMGAS, modelo 500 dm³. [8]

		V_{20}/L	
<i>Lectura en la campana/L</i>		<i>Lectura final/L</i>	$U(V_{20})/ \%$
		300	
<i>Lectura Inicial/L</i>	200	100.06	0.32

La calibración de la campana consistió en obtener el volumen que tiene la campana entre dos graduaciones: lectura inicial, L_i a lectura final, L_f de la escala lineal.

El método de calibración fue por comparación directa, esto es, la masa de aire que pasa por el medidor debe ser igual a la masa de aire colectada en la campana. Aplicando este razonamiento a los medidores de tipo tobera y campana gasométrica:

$$q_{m_{tob}} = \frac{\rho_c \cdot V_c}{\Delta t} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$V_c = \frac{\Delta t \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_g^2 \cdot C^* \cdot C_d \cdot p_o}{4 \cdot \sqrt{\frac{R}{M_a \cdot \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]} \cdot T_o}} \right)}{\rho_c} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde $q_{m_{tob}}$ [kg/s]: es el caudal másico en la tobera, ρ_c [kg/m³]: es la densidad del aire a las condiciones de presión y temperaturas de la campana, V_c [L]: es el volumen de la campana en las condiciones de la calibración. y Δt [s]: es el tiempo invertido en el volumen calibrado.

El volumen que se informa en el certificado es el promedio de 8 mediciones y se obtiene aplicando la siguiente relación:

$$V_{20} = V_c \cdot [1 + 3\alpha \cdot (20 - T_c)] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde: V_{20} [L]: es el volumen de la campana a temperatura a 20 °C, V_c [L]: es el volumen de la campana a condiciones de calibración, α [1/°C]: es el coeficiente lineal de expansión térmica del material de la campana y T_c [°C]: es la temperatura del aire en la campana.

Método de pesaje para la calibración de la campana gasométrica

Entre los métodos que se aplican en la calibración de los medidores de flujo de gas, el método de pesaje encuentra una gran aceptación en la comunidad ingenieril. Aunque este método consume gran cantidad de tiempo y depende mucho de la tecnología, resulta ser una herramienta útil en la calibración de medidores de flujo de gas. Sin embargo, no se aplica para calibraciones de rutina en instrumentos de proceso o un gran número de patrones de transferencia. El equipamiento utilizado en este método es directamente trazable a las unidades fundamentales de masa y tiempo y presenta incertidumbres bajas. Ejemplo de la utilización de este método fue el trabajo realizado en la Fábrica de Gas de Zagreb, Croacia en el año 2008. Aquí, usando el método de gravimétrico, se logró la calibración de la campana gasométrica y medidores de flujo de gas en un rango hasta 1,4 m³/h.

El sistema de calibración básico se muestra en la Figura 6. Este consiste en que el aceite abandona el contenedor cerrado y es colectado en un tanque abierto colocado en una balanza electrónica. El volumen del aceite que fluye del contenedor es reemplazado por una cantidad igual de aire. Como la densidad del aceite es conocida, el volumen del aceite en el tanque abierto fue obtenido a partir del pesaje, determinándose así el volumen de la campana y efectuándose la calibración. Se llevaron a cabo correcciones para la fuerza de empuje del aire y los gradientes de temperatura en el aceite y en el aire.

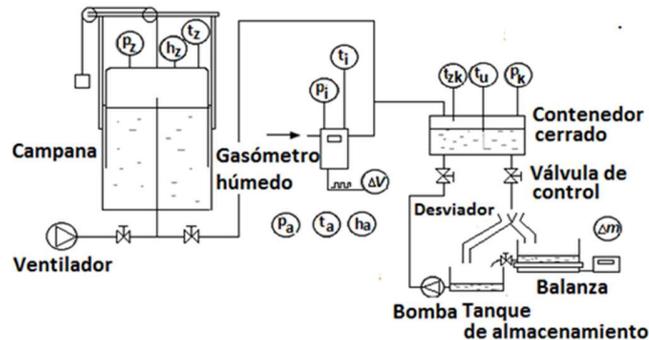


Figura 6. Sistema básico para calibrar la campana gasométrica y el gasómetro húmedo

El contenedor cerrado de 70 dm³ fue colocado 2 m encima del piso y conectado a la salida de un medidor de flujo de gas de transferencia y a la salida de la campana. De esta forma, el aceite que sale del contenedor fluye a través de una válvula de control al desviador. El desviador dirige el flujo al tanque abierto en la balanza o hacia el tanque de almacenamiento. Los flujos utilizados fueron de 0,07 m³/h a 1,1 m³/h. Dos procedimientos diferentes de medición pueden ser realizados utilizando el sistema básico de calibración, esto es, la calibración de la campana gasométrica y la calibración del medidor de flujo de gas de transferencia. El procedimiento de medición es prácticamente el mismo para ambos. El aceite que fluye del contenedor cerrado al tanque de almacenamiento o a la balanza es regulado usando una válvula de control y un desviador. [9]

Calibración de la campana gasométrica utilizando un contador de gas como referencia

En 2015 en Lituania se reportó una forma diferente de calibración de la campana gasométrica. Sus autores plantean que el principal objetivo de la calibración de la campana gasométrica es evaluar el vínculo entre el volumen desplazado de aire dV_{aire} y el desplazamiento de la campana dH . El volumen de aire desplazado a los valores de temperatura y presión durante la calibración es igual al cambio en el volumen de la parte no sumergida de la campana dV_{camp} . El carácter de este vínculo es bien conocido, es lineal. El coeficiente de enlace es:

$$k_v = \frac{dV}{dH} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Especifica el valor de aire desplazado por unidad de desplazamiento de la campana gasométrica. En un caso ideal el coeficiente k_v es igual a la sección transversal. En

realidad, varía ligeramente a través de la altura de la campana debido, primeramente, a la variación de la sección de la campana a lo largo de su altura, que en cambio es causada por imperfecciones producto de las técnicas de fabricación. El segundo factor importante que afecta el coeficiente k_v es la variabilidad de la presión en la campana. Si la presión de aire es constante, un valor local del coeficiente coincide con el valor local de la sección transversal. Si la presión del aire está cambiando el coeficiente varía de forma diferente a la sección transversal. El coeficiente k_v algunas veces se llama volumen específico desplazado.

En la base de las simulaciones numéricas se muestra que el movimiento de la campana es desigual. La presión y el volumen de aire desplazado fluctúan durante el desplazamiento de la campana. Experimentalmente se demuestra que la velocidad de la campana tampoco es constante. Por lo tanto, esto provoca variaciones en k_v .

El esquema de medición para la realización de este método se presenta en la Figura 7. Para la medición del volumen de gas se utilizó un medidor de gas de tipo rotatorio A-DUO, cuyo tamaño dependía del tamaño de la campana. Este medidor poseía buena repetibilidad y está calibrado con una incertidumbre de $\pm (0,1 \text{ a } 0,2) \%$.

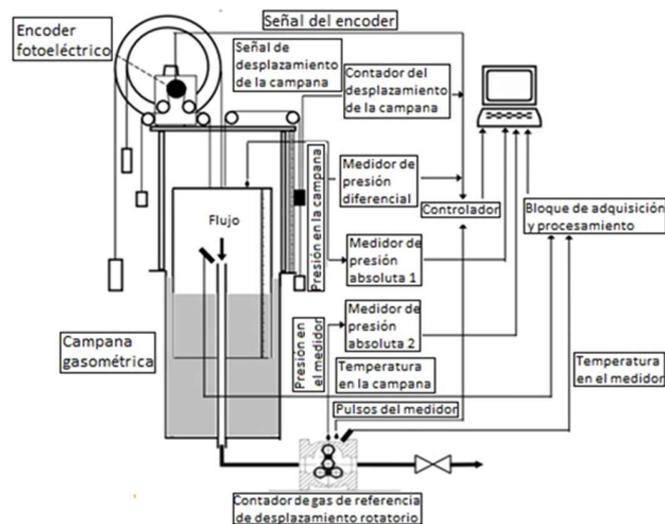


Figura 7. Esquema de la instalación de calibración

Para asegurar una incertidumbre de calibración suficientemente baja el número de pulsos de la señal de desplazamiento de la campana para cada volumen de aire registrado no debía ser menor que 10^4 . Esto significa que el número de pulsos concerniente al desplazamiento completo de la campana debió ser del orden de $(2 \text{ a } 3) \times 10^6$. En particular, se usa el *encoder* tipo A90H de la compañía PRECIZIKA METROLOGY, 450 000 pulsos en una revolución.[10]

Para este método es de interés un conjunto de parámetros importantes a lo largo de la longitud de la campana como cambio en el flujo relativo de aire desplazado (razón del flujo instantáneo Q_i y el promedio tomado de los valores a través de la altura Q_{av}) y el cambio correspondiente en la presión diferencial en la campana en movimiento. Por lo tanto, permite el diagnóstico de condiciones técnicas de la instalación y su perfección técnica.

Método de encintado y por máquina de medición por coordenadas para la calibración de la campana gasométrica

Otra manera de obtener la constante de calibración K , vista en el método de desplazamiento y, por lo tanto, de calibrar la campana gasométrica es la técnica dimensional que logra trazabilidad al Patrón de Longitud, reportada en México en el 2004.

Este método se basa en determinar el diámetro interno promedio de la campana. Para ello se hace uso de una cinta especial (conocida como π tape) de cuya escala de medición se obtiene directamente el diámetro externo del artefacto, de manera similar al método de encintado. Alternativamente, el diámetro interior de la campana puede medirse usando una máquina de medición por coordenadas de tamaño conveniente. Esto lo hace diferente al método de encintado que considera solo el uso de la cinta métrica.

Al combinar el diámetro promedio de la campana y la constante del desplazamiento vertical [pulsos/mm], se puede obtener la constante de pulsos por unidad de volumen, según la siguiente ecuación:

$$K = \frac{K_L}{A} = \frac{4 \cdot K_L}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde K_L es la constante lineal (pulsos por unidad de longitud) y D el diámetro interno de la campana.[6]

El CENAM reporta que es necesario determinar la constante de calibración K no solo por ser una constante de proporcionalidad entre el volumen desplazado y la cantidad de pulsos emitidos por el *encoder* durante dicho desplazamiento, sino también para determinar los factores de corrección de un medidor de flujo de gas.

Calibración mediante el uso de un rastreador láser

En 2015 especialistas de la ciudad de Kiev, Ucrania reportan la medición de las dimensiones geométricas de los medios de medición de volumen mediante un

rastreador láser, con el objetivo de disminuir la incertidumbre de medición. Esto les permitió aumentar la exactitud de las instalaciones para la verificación de medidores de agua y de gas. La investigación abarcó también un patrón de flujo de gas, una campana gasométrica.

Para la medición de la campana gasométrica de 0,7 m de diámetro y longitud 1,2 m, esta se situó horizontalmente y fue fijada sobre una cuña montada sobre un piso de concreto. El rastreador láser fue montado sobre una plancha de metal de modo que el centro se dispusiera sobre el eje del cilindro a una distancia de 3,5 m del borde de la campana. El eje de las abscisas del sistema de coordenadas del rastreador fue orientado paralelo al eje del cilindro. Se utilizó un reflector esférico en los puntos de coordenadas. Durante el análisis se utiliza un rastreador láser Faro ION.

Para el cálculo de la temperatura real de la superficie fueron colocadas ocho sensores de temperatura, conectados a un instrumento secundario. La temperatura de la superficie de la campana gasométrica se midió con un intervalo de 10 minutos, incertidumbre de medición 0,1 °C. En calidad de temperatura se tomó el valor medio de los ocho sensores.

El esquema general de medición se representa en la Figura 8.

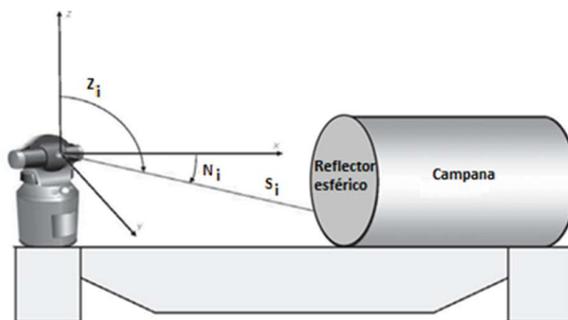


Figura 8. Esquema general de medición de las coordenadas espaciales de los puntos de referencia en la superficie interna de la campana

Con ayuda del rastreador se realiza la medición de distancia S_i , los ángulos horizontales N_i y verticales Z_i .

Durante el tiempo del experimento se determinaron las coordenadas de 30-38 puntos, igualmente dispuestos por los alrededores del cilindro de la campana gasométrica en cada una de las 16 secciones longitudinales y en una sección complementaria donde existe una soldadura. En total fueron determinadas las

coordenadas de cerca de 600 puntos de referencia [11].

Los parámetros geométricos de orientación, dimensiones y forma entran en la fórmula para el cálculo de los intervalos de capacidad de la campana (calibración):

$$V_{z_f} = \Psi_v(\tau_1 \dots \tau_k, z_f) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde z_f es la altura absoluta de número f del nivel de líquido en la campana, para la cual se calcula la capacidad interna, $\tau_1 \dots \tau_k$ parámetros geométricos determinados de la superficie del objeto y V_{z_f} el volumen de la campana (intervalo de capacidad) desde su plano horizontal inferior, tomado al comienzo de la sección de trabajo de la campana hasta z_f .

Calibración mediante el uso de un brazo con sensores de distancia

En 2011 en Eslovaquia se reportó la calibración de la campana gasométrica mediante otro método geométrico similar al empleado por [12]. Sus autores plantean que la calibración incluye la determinación de las dimensiones geométricas internas de la campana en 110 niveles horizontales. También los instrumentos instalados en la campana gasométrica fueron calibrados. Una estructura especial fue fabricada para centrar un dispositivo de medición dentro de la campana y adjuntarle un brazo de medición. Una fotografía del aparato se muestra en la Figura 9. La plataforma de esta estructura (posición 6) donde se sujetó el brazo fue equipada con un motor paso a paso para desplazamientos horizontales hasta 180°.

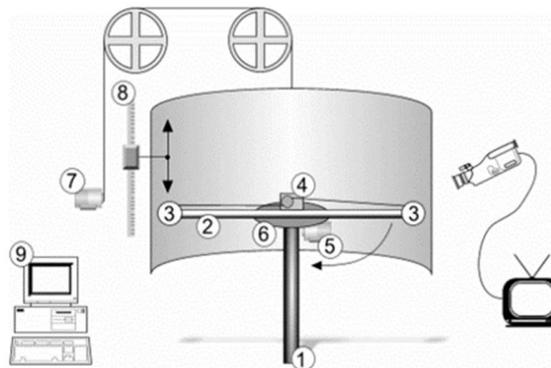


Figura 9. Esquema de los equipos de medición utilizados para determinar los parámetros geométricos de la campana.

Se utilizaron micrómetros digitales con una interfaz de comunicación (posición 3),

rango de medición de 12 mm, resolución de 1 mm y posibilidad de transmisión remota de los datos medidos. Se realizó también desplazamiento vertical usando un motor paso a paso para el movimiento de la regla vertical (posición 7). El proceso de determinar los parámetros geométricos corre automáticamente y se controla desde el centro de control por un programa de computadora diseñado para estas mediciones (posición 9). Un sistema de video fue usado para monitorear las mediciones dentro de la campana.

Las mediciones se realizaron en cincuenta diámetros en cada uno de los 110 planos horizontales resultando en 5 500 puntos de medición [13]. El intervalo de tiempo de un ciclo fue de aproximadamente 12 horas y cada ciclo fue repetido tres veces. Las áreas de la campana en cada sección transversal son calculadas de los valores medidos y utilizadas para determinar el volumen de la campana.

CONCLUSIONES

Hoy en día los combustibles derivados de hidrocarburos constituyen la principal fuente de energía y entre ellos, el gas natural es uno de los que más se utiliza. Ante esta situación, Cuba o cualquier otro país productor o consumidor de gas natural, requiere que sus instrumentos de medición de volumen y flujo de gas midan con la mayor exactitud posible. Para garantizar que la medición de flujo sea exacta, es necesario lograr la trazabilidad mediante la calibración.

Saltarse este paso en la medición de flujo de gas natural implicaría pérdidas económicas, si se está llevando a cabo una medición para una facturación o si no se puede realizar un adecuado control de procesos donde el flujo de gas es insumo o producto podrían ocurrir accidentes humanos, ya que este es un gas combustible y de riesgo toxicológico. También sería muy difícil reproducir procesos de investigación y desarrollo de tecnologías debido a carencia de resultados técnicamente válidos.

Las campanas gasométricas forman parte de la solución al problema de la trazabilidad mediante la calibración, sin embargo, es evidente que ellas requieren a su vez ser calibradas.

Las campanas gasométricas son calibradas usando métodos volumétricos (método de botellas de pie cúbico, método de desplazamiento), métodos geométricos (método de encintado, máquina de medición por coordenadas, rastreador láser, brazo con sensores de distancia), métodos de pesaje, usando toberas de flujo crítico y contadores de gas como patrones de referencia. Cuba posee campanas gasométricas y especialistas cubanos han incursionado en su calibración mediante el método volumétrico, aunque debe continuar prestando atención a este tema para lograr la trazabilidad de todas las campanas gasométricas que entren al país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Szewczyk, R et al. (Eds.), *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*, AISC 1044, Springer Nature, Switzerland, 2020, pp. 172-177.
- [2] Romero R. A., Trazabilidad e incertidumbre en las mediciones de flujo de hidrocarburos, en 1er Seminario Latinoamericano de Medición de Flujo de Hidrocarburos, México, 2002.
- [3] Oficina Nacional de Normalización, NC 1006: 2020 “Metrocontadores de gas de diafragma –Métodos y equipos de verificación.”
- [4] Collett C. T., Calibration of Bell Provers by Dimensional Analysis and by Cubic Foot Standards, presented at Appalachian Gas Meas. Short Course, U.S., 1964.
- [5] Wright J. D., Mattingly G. E. NIST calibration services for Gas Flow Meters, Piston Prover and Bell Prover Gas Flow Facilities, NIST Special Publication, 1998.
- [6] Maldonado J. M. y Gervacio, J. C., Calibración del patrón nacional de flujo de gas por el método de desplazamiento, en Simposio de Metrología, México, 2004.
- [7] Apaceiro M. H. y Delgado G. E., Aseguramiento metrológico en la magnitud de volumen y flujo a la instalación de verificación de contadores domésticos de gas, Boletín Científico Técnico INIMET, 2006.
- [8] Gervacio J. C., Tobera de flujo crítico como patrón de calibración de medidores industriales tipo campana, en *Simposio de Metrología*, México, 2010.
- [9] Pavlovic B., Kozmar H. and Šunić M. Advances in Gas Flow Measurement using Weighting Method, *Strojarstvo* 50 (5), 2008.
- [10] Tonkonogij J., Stankevičius A., Bertašienė A., Tonkonogovas A., The new method for calibration and testing of the bell type prover, in 17 International Congress of Metrology, EDP Sciences, 2015.
- [11] Кузьменко, Ю.В., Самойленко, А.Н. Градуировка колокола установок для поверки счетчиков текучей среды, *Український метрологічний журнал*, № 1, 2015.
- [12] Mickan B., Kramer R. Evaluation of two new volumetric primary standards for gas volume established by PTB, in 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement, USA, 2009.
- [13] Benkova M., Makovnik S., Mikulecky I., Zamecnik V., Bell Prover - Calibration and Monitoring of Time Stability, *Journal of Metrology Society of India*, Vol. 26, No. 3, 2011.