

UNIVERSIDAD DE LA HABANA

Cátedra de Calidad, Metrología y Normalización

**Método de calibración de las campanas
gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de
Máster en Ciencias en Metrología**

Autor: Lic. Fran Javier Buzón González

Tutor: M. Sc. Alejandra Regla Hernández Leonard

2021

Agradecimientos

Un trabajo como este implica el apoyo y la colaboración de dirigentes, colegas, familiares y amigos. La ciencia, como manifestación social, no puede desarrollarse sin la ayuda mutua entre los hombres; por lo que me gustaría expresar mi gratitud, respeto y afecto a todos los que de una forma u otra han contribuido a la producción de esta tesis. En especial a quiero agradecer a:

- La M. Sc. Alejandra Regla Hernández Leonard, mi tutora, por su ayuda inapreciable en la concreción y estructuración de esta tesis, sin la cual hubiese sido imposible esta realidad.
- El Consejo de Dirección del Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología (INIMET) por confiar en mí y permitirme llegar hasta este momento.
- El Comité Académico y los profesores que impartieron con gran profesionalidad los créditos de esta Maestría en Metrología y me enseñaron a investigar y a crecer.
- La Dr. C. Rosa Mayelin Guerra Bretaña por su tiempo, sus oportunas sugerencias e inteligentes observaciones.
- Mis compañeros del Laboratorio de Volumen del INIMET, por su preocupación, palabras de aliento y expectativa positiva.
- Los trabajadores del Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET, por su amabilidad y generosidad de poner a mi disposición sus experiencias y conocimientos.

Síntesis

Las campanas gasométricas son instrumentos de medición destinados a las mediciones de flujo y volumen de gas y a la verificación de contadores de gas. En la actualidad existen más de cinco métodos diferentes de calibración de campanas gasométricas que se emplean en el mundo, por lo que el objetivo de esta investigación es establecer cuál es el método idóneo para la calibración en Cuba de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100. Se utilizaron los métodos científicos: histórico-lógico, hipotético-deductivo, dialéctico, de modelación, la observación científica y la medición. Se analizó el estado del arte relacionado con las campanas gasométricas con relación a su base teórica, principio de medición y funcionamiento, así como los métodos tradicionales y más recientes para su calibración. Además, se caracterizaron los modelos LJQ-20 y LJQ-100 y se realizó el diagnóstico de su estado actual. El análisis de los resultados de la aplicación de los métodos mencionados propició determinar que el método de calibración de encintado es el más adecuado para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 que se encuentran en Cuba y, consecuentemente, se elaboró una instrucción de calibración basada en este método.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1 Fundamentos teóricos y métodos de calibración de las campanas gasométricas	8
1.1 Base teórica y funcionamiento de las campanas gasométricas.....	8
1.2 Métodos de calibración tradicionales	16
1.2.1 Calibración por botella de pie cúbico	16
1.2.2 Método de encintado	19
1.3 Métodos recientes para la calibración de las campanas gasométricas... ..	22
1.3.1 Rastreador láser	22
1.3.2 Encintado y por máquina de medición por coordenadas	24
1.3.3 Brazo con sensores de distancia	26
1.3.4 Método gravimétrico	27
1.3.5 Método de desplazamiento	28
1.3.6 Contador de gas de referencia de desplazamiento rotatorio	32
1.3.7 Método de tobera de flujo crítico.....	34
Capítulo 2 Diagnóstico y selección del método de calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100	37
2.1 Caracterización de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100.....	37
2.2 Diagnóstico de la situación	39
2.3 Selección del método de calibración idóneo para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.....	43
Capítulo 3 Método de encintado para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 en Cuba.....	54
3.1 Análisis de la incertidumbre de medición del método de encintado.....	54
3.2 Instrucción de calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100	56
Conclusiones.....	72
Recomendaciones.....	73
Referencias bibliográficas	74
Anexos	

Introducción

La internacionalización de la economía y el desarrollo científico y tecnológico requieren que los profesionales adquieran las herramientas necesarias para enfrentar los retos de la globalización, que abarca también el campo de la metrología. Entre estos retos está la necesidad global de una trazabilidad metrológica confiable de las mediciones de longitud, masa, volumen, densidad, corriente eléctrica o energía, solo por mencionar algunos ejemplos, y Cuba no es ajena a esta situación.

El interés por encontrar soluciones para las limitaciones existentes en el campo de la metrología es grande en Cuba, de manera específica, “el desarrollo creciente de la Industria del Gas y particularmente el aumento de la cantidad de contadores domésticos instalados, se impone establecer una prioridad al aseguramiento metrológico en el tema de las mediciones de volumen y flujo de gas” (Hernández Apaceiro & Espinosa Delgado, 2006, pág. 6). En este contexto, es imperante la apertura al conocimiento de otras formas de medición que den solución a las necesidades existentes en el país.

Según el Anuario Estadístico de Cuba 2018, en el 2017 fueron importadas 115 200 toneladas de gas licuado y 51 400 toneladas fueron producidas. De ellas 93 000 toneladas fueron consumidas por la población. En el 2018 fueron extraídos 970,1 millones de metros cúbicos de gas natural y fueron producidos y consumidos aquí 188,7 millones de metros cúbicos de gas manufacturado; de ellos 112,5 millones de metros cúbicos fueron consumidos en los hogares ese mismo año (Oficina Nacional de Estadística e Información, 2018). Esto evidencia la necesidad del uso, ahorro y control del gas.

El programa estatal de ahorro de energía de Cuba tiene entre sus objetivos la introducción de nuevas tecnologías, la utilización de recursos renovables, la modernización de las mediciones y el control en el uso de los recursos energéticos. Dentro de su política contempla llevar a cabo acciones para el uso racional del agua, la energía térmica y el gas en la población a cuenta de la introducción de equipamiento efectivo e instrumentos de medición, regulación y control. Entre ellos están las campanas gasométricas destinadas a las mediciones de flujo y volumen de gas y a la verificación de contadores de gas. Los sectores involucrados en medición de gases, sea cual sea su aplicación, deben garantizar transparencia en sus mediciones seleccionando equipos adecuados al tipo de proceso y manteniéndolos dentro de los límites de error e incertidumbre permisibles y aplicables a cada uno de ellos. Así pues, la investigación surge a partir de la necesidad de brindar aseguramiento metrológico a todas las campanas gasométricas del país a pesar del bloqueo económico, que dificulta la adquisición de patrones de medición y la transferencia de conocimiento científico-técnico relacionado con el campo de la metrología.

En el 2014 fueron adquiridas en China dos campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 (fabricante Hangzhou TNMA *Measure Technology Co., Ltd.*) con sus bancos incluidos, para la determinación del error de los contadores de gas. Estos modelos no existían en el país y arribaron con certificados de verificación emitidos por el Instituto Provincial de Metrología de Zhejiang, pero sin un patrón para su calibración. La Disposición General DG-01 (Oficina Nacional de Normalización, 2020) no establece la verificación de este instrumento de medición y, por otra parte, un certificado de verificación es

válido solo por un período de tiempo., por lo que se hace necesario calibrar las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100, para darle aseguramiento metrológico a los contadores de gas.

La investigación constituye uno de los pasos para garantizar la trazabilidad metrológica de las mediciones de volumen de combustible y flujo de gases, donde se utilicen campanas gasométricas como patrones de referencia. Por lo tanto, un estudio de los métodos nacionales e internacionales con el objetivo de calibrarlas apremia hoy en día, ya que es imprescindible definir el método idóneo para la calibración de las campanas gasométricas en el país.

En aras de facilitar la comprensión del análisis que se realiza en esta investigación, se mencionan algunas situaciones y limitaciones que se observan en la realidad diaria:

- la interrupción del servicio de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 por ausencia de trazabilidad metrológica para la verificación de contadores de gas de uso doméstico,
- la necesidad de definir el método idóneo para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100, cuya aplicación permita reiniciar el trabajo de verificación que estas realizan,
- la necesidad de obtener el reconocimiento internacional de las mediciones de flujo y volumen de gas en Cuba,
- la alta demanda de servicios de verificación que se ofrecen con las campanas en correspondencia con las necesidades de la Empresa de Gas Manufacturado responsabilizada con la instalación de contadores de gas en centros, instituciones y hogares,

- la necesidad de verificación de los contadores de gas y de su trazabilidad metrológica para reducir las insatisfacciones en la población,
- la necesidad de incrementar la exactitud de las verificaciones a contadores de gas realizadas por las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 mediante una calibración apropiada de estas,
- la instalación de contadores de gas y el reemplazo de aquellos que se encuentran en mal estado para evitar la pérdida de recursos en el país,
- impacto negativo del bloqueo económico del gobierno de los E.E.U.U. en el desarrollo de la Metrología cubana en este campo.

Todo lo expresado anteriormente (estado actual) evidencia la necesidad de cambios en el proceso de aseguramiento metrológico de las mediciones de volumen y flujo de gas (estado ideal). Se presenta una situación de conflicto entre el estado actual del control metrológico de las campanas gasométricas y lo que se requiere en ese sentido; establecer el método idóneo para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100, para brindar aseguramiento metrológico a todas las campanas gasométricas del país.

Partiendo de las consideraciones anteriores, que evidencian la importancia de este trabajo, se plantea como problema científico:

¿Cuál es el método idóneo para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 pertenecientes al Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET, Cuba?

Para dar solución al problema planteado se establecen los siguientes objetivos.

Objetivo General:

Establecer el método de calibración idóneo en las condiciones actuales de Cuba para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100, que se encuentran en Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET.

Objetivos específicos:

1. Analizar el estado del arte de las campanas gasométricas con relación a su base teórica, funcionamiento, así como los métodos de su calibración.
2. Diagnosticar el estado actual que presenta la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 en Cuba.
3. Identificar el método idóneo para la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 en Cuba.
4. Establecer la documentación necesaria para la aplicación del método seleccionado.

Objeto de estudio: Método de calibración de las campanas gasométricas.

En el nivel teórico se utilizaron los siguientes métodos de investigación:

El método histórico-lógico para propiciar el estudio lógico del desarrollo histórico de los métodos empleados para la calibración de las campanas gasométricas en Cuba y el mundo.

El método hipotético-deductivo al plantearse la viabilidad de la aplicación del método de encintado para la calibración de campanas gasométricas y, en consecuencia, la fundamentación a través de datos y hechos, análisis documental, criterio de especialistas, mediciones, y observaciones.

El método dialéctico se utilizó con el objetivo de llegar a conclusiones a partir de contradicciones que surgieron al acumular los datos que, paulatinamente,

condujeron a cambios en el modo de pensar respecto a cuál método de calibración sería el idóneo implementar hasta llegar al método de encintado.

El método de modelación se empleó a partir de la elaboración de presupuestos de incertidumbre para sustituir el objeto de investigación por un modelo, el cual representara un reflejo ideal de la realidad y se sustentara en la lógica de la ciencia de modo tal, que corroborara la factibilidad de implementar el método de encintado en el país. El modelo físico, basado en la unidad sujeto-objeto, permitió realizar abstracciones y llegar a conclusiones.

En el nivel empírico se utilizaron los métodos y técnicas siguientes:

- a) La observación científica: Se utilizó de forma directa, abierta y estructurada al observar las condiciones ambientales del lugar, el estado físico de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 y la evidencia de si fueron calibradas. Además, se observó si se estaban utilizando para calibrar los metros contadores de gas, obteniéndose información primaria acerca de los objetos investigados.
- b) La medición: Se utilizó al determinar, de manera cuantitativa, el diámetro y altura de las campanas, el diámetro de los tanques, las diferencias de alturas de líquido, el ancho y espesor de placa de escala. Se midieron, además, las condiciones ambientales del laboratorio.

En el nivel matemático se utilizaron las derivadas parciales, y la estadística matemática.

La significación práctica de la investigación es la propuesta de un método de calibración idóneo para las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 en Cuba.

La tesis está estructurada en Introducción, tres Capítulos de desarrollo Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y 12 Anexos.

Capítulo 1 Fundamentos teóricos y métodos de calibración de las campanas gasométricas

En este capítulo se analiza el estado del arte relacionado con las campanas gasométricas, las bases teóricas de su funcionamiento, y los métodos tradicionales y más recientes para su calibración.

1.1 Base teórica y funcionamiento de las campanas gasométricas

Hoy en día tanto a los fabricantes de instrumentos de medición como a sus usuarios les interesa la trazabilidad metrológica de sus mediciones. A nivel gubernamental los organismos reguladores deben exigir trazabilidad en las mediciones para garantizar la seguridad de la población, la protección al consumidor o simplemente el cobro de servicios públicos (suministro de gas, agua, electricidad, entre otros).

Según el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) la trazabilidad metrológica se define como: “Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida” (Oficina Nacional de Normalización – Organización Internacional de Metrología Legal, 2020, pág. 31).

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de esquema de trazabilidad metrológica para una campana gasométrica en México, cuya concepción es aplicable a un servicio de medición y calibración como el que se propone establecer en esta investigación.

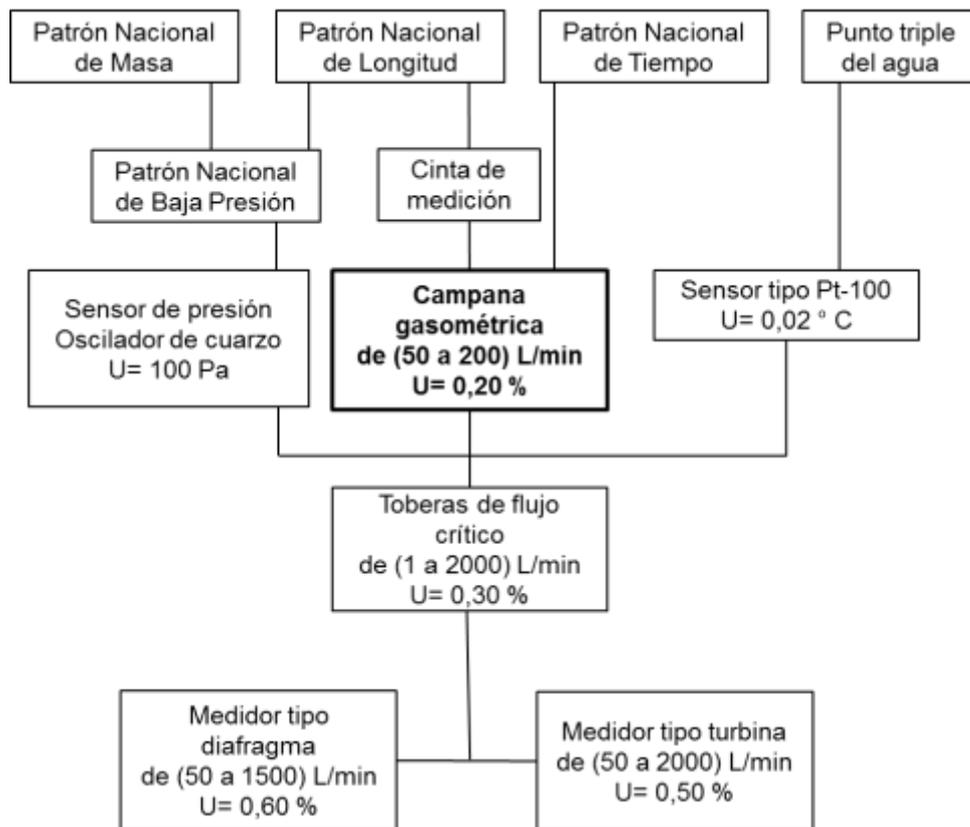


Figura 1. Ejemplo de esquema de trazabilidad de México para las mediciones de volumen y flujo hasta 2000 L/min.

Fuente: Romero (2002, pág. 5)

Actualmente las mediciones de volumen y flujo de gas se realizan, mayormente, con flujómetros de diferentes principios de medición, dígame por desplazamiento positivo (tipo diafragma y tipo rotativo), por turbina, por ultrasonido, o por presión diferencial. Entre los patrones primarios reconocidos por la comunidad internacional como referencia para la calibración de flujómetros de gas están presentes las campanas gasométricas. “Comúnmente halladas en instalaciones de calibración, transfieren la unidad de volumen de gas y de flujo volumétrico” (Szewczyk, Krejsa, Nowicki, & Ostaszewska, 2020, pág. 172).

Las campanas gasométricas vienen utilizándose desde principios del siglo XX como patrón de referencia y con frecuencia el gas que utilizan es aire. Según la ISO 4006:1991 *Measurement of fluid flow in closed conduits -Vocabulary and Symbols* la campana gasométrica se define como:

Dispositivo de medición volumétrico utilizado para gases y 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 (International Organization for Standardization, 1991, pág. 30).

En el Anexo 1 se muestra un sistema típico para medir flujo donde está presente la campana gasométrica se compone de la tubería de entrada, el flujómetro, una tubería que conecta el flujómetro a un volumen de colección (V_c) y una válvula desviadora usada para dirigir el flujo a V_c . (Mazur, Rak, & Shchupak, 2015). El volumen de colección es el volumen dentro de la campana barrido por el desplazamiento de esta durante el intervalo de tiempo, Δt , que le toma en trasladarse desde la posición de inicio a la de parada (Wright & Mattingly, 1998).

La calibración de flujómetros empleando este sistema está basada en la ecuación de conservación de la masa.

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV + \int_A \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

Ec. 1

Donde ρ es la densidad del fluido, $\frac{\partial}{\partial t}$ es la derivada parcial con respecto al tiempo y V es el volumen de control estacionario para el balance de la masa.

La cantidad \vec{v} es la velocidad del fluido y $d\vec{A}$ es el elemento de área de la

superficie vectorial de control con dirección hacia afuera y normal a la superficie de control que rodea el volumen V .

Aplicada a una campana gasométrica, una forma conveniente para la ecuación de continuidad arroja el flujo másico, \dot{m} , en el sistema como:

$$\dot{m} = \frac{\rho_c \cdot V_c}{\Delta t} + \frac{\Delta \rho_a \cdot V_a}{\Delta t} + \dot{m}_\ell \quad \text{Ec. 2}$$

Donde V_c es el volumen de colección. La cantidad V_a es el volumen de conexión (Anexo 1) definido como el volumen interno remanente en el sistema, incluye el volumen del flujómetro bajo prueba, la tubería que conecta el flujómetro al calibrador, el volumen restante de la campana, y las tuberías para las conexiones del transductor de presión. La densidad media del gas en el volumen de colección, ρ_c , es calculada de mediciones de presión y temperatura realizadas durante la corrida, y $\Delta \rho_a$, es la variación en la densidad del gas en la tubería entre el comienzo y final de la corrida.

El segundo término en la parte derecha de Ec. 2 tiene en cuenta el efecto de almacenamiento en el volumen de conexión, V_a : si la densidad del gas en V_a , se incrementa por encima de algún valor inicial (debido a temperatura decreciente o presión creciente), entonces el gas es efectivamente "guardado" en las tuberías de conexión o campana. Por ejemplo, si el perfil de temperatura dentro de la tubería de conexión no ha llegado a un estado estable, entonces la densidad del gas en la tubería de conexión puede estar aumentando, llevando a un incremento de la masa total del gas en la tubería de conexión, lo que significa que menos gas está llegando al volumen de colección que lo que pasa por el flujómetro bajo prueba en ese momento.

Es importante reconocer que el gas no tiene que alcanzar la misma temperatura a través de la campana y las tuberías para hacer los efectos de almacenamiento igual a cero, más bien que la distribución de temperatura dentro del sistema debe alcanzar un estado estable de modo que variaciones en la densidad con respecto al tiempo sean cero a través del sistema. El estado estable puede ser alcanzado permitiendo a las temperaturas estabilizarse en un determinado flujo. Estos efectos pueden hacerse menores trabajando a temperaturas del gas cercanas a la temperatura ambiente. No hay ningún término en Ec. 2 para tomar en cuenta variaciones en el volumen de las tuberías de conexión durante el tiempo de colección ya que estos efectos son insignificantes (las variaciones en el volumen son de $\approx 3\alpha\Delta T \approx 3 \times 10^{-7}$ para la mayoría de los casos ya que $\alpha \approx 10^{-6}$ y $\Delta T \approx 0,1$ K).

El término \dot{m}_l se utiliza para representar un flujo de fugas hacia dentro o hacia fuera del sistema. “Las fugas hacia fuera del sistema son pequeñas, ya que se realizan chequeos (o controles) que permiten minimizarlas antes de comenzar las calibraciones” (Wright & Mattingly, 1998, pág. 4). La única fuente significativa de flujo másico hacia dentro del sistema (que no fluyó dentro del flujómetro bajo prueba) es por evaporación del líquido de sellaje (aceite).

El sistema de campana gasométrica (Anexo 1) consiste en un tanque cilíndrico abierto arriba y un “pozo seco” central, que juntos forman un anillo que contiene aceite sellante. En este anillo se coloca un tanque cilíndrico invertido, una campana abierta en la parte inferior con un techo en forma de domo. Su peso es casi balanceado con contrapesos de modo que pueda ser elevado o bajado por una pequeña diferencia de presión (0,3 kPa) para coleccionar y medir el volumen de gas.

Un pequeño contrapeso es montado en una leva de modo que provea una corrección para efectos de empuje a medida que cambia la inmersión de la campana en el líquido sellante. Las imperfecciones en el sistema de leva y contrapeso llevan a una variación de la presión bajo la campana durante el tiempo de colección. Esta variación de la presión contribuye a la incertidumbre de medición del flujo. Los rodillos y varas guías proveen estabilidad lateral en la posición de la campana mientras se mueve hacia arriba.

Una vez que las condiciones de flujo a través del metro contador bajo prueba son estables, una válvula *bypass* se cierra dirigiendo gas hacia la campana. Durante la calibración de flujo, se mide el tiempo requerido para la traslación de la campana entre una posición de inicio y una de parada. El volumen de colección (determinado con anterioridad) es dividido por el tiempo de colección para obtener el flujo volumétrico. El flujo másico puede ser calculado a partir de la temperatura y la presión del gas colectado, con vistas a obtener la densidad del gas. El líquido sellante es generalmente aceite a baja presión de vapor.

Aunque los laboratorios de mayor nivel llegan a incertidumbres de 0,06 %, los laboratorios de medición de flujo que usan campanas gasométricas para calibraciones de flujómetros de rutina tienen Capacidades de Medición y Calibración (CMC) que van de 0,2% a 0,6% dependiendo de las regulaciones concernientes al medidor bajo prueba y la medición (Szewczyk, Krejsa, Nowicki, & Ostaszewska, 2020, pág. 172).

Al realizar una calibración usando la campana gasométrica, el flujómetro y su instrumentación son instalados en el sistema de tuberías y se comprueba la existencia de fugas. De modo que se alcance una condición de temperatura estable antes de comenzar el proceso de calibración. Se establece el flujo a

través del flujómetro y la válvula *bypass* (Anexo 1) se ajusta de manera que la campana "flote" por encima del soporte del fondo. Entonces la válvula se cierra y todo el flujo es desviado a la campana desplazándose de su posición inicial. Luego de esta primera corrida la válvula *bypass* se ajusta de manera que la campana flote como antes. La válvula *bypass* se cierra y, luego de un período breve de aceleración y de oscilaciones de presión, la campana adquiere una velocidad constante y condiciones de estado continuo. Entonces pasa a un intervalo de colección que es medido usando interruptores ópticos de fotodiodos que indican las posiciones de inicio y parada.

La medición del volumen de colección se complica por el hecho de que el nivel del líquido sellante se mueve durante el uso de la campana gasométrica por diversas razones. La ligeramente elevada presión interna de la misma (necesaria para que esta se eleve durante la colección) causa que el nivel del aceite sea menor en el interior que en el exterior.

A medida que la campana sale del aceite durante la colección del gas, sus paredes de metal desplazan menos aceite y, consecuentemente, el nivel del aceite cae. También el aceite se adhiere a la superficie interna y externa mientras la campana gasométrica se eleva, disminuyendo el nivel del aceite en el tanque. Usar aceite de baja viscosidad minimiza el efecto de adherencia del aceite.

El cerrar la válvula *bypass* causa cambios en la presión dentro de ella y lleva a movimientos oscilatorios del aceite entre las superficies interna y externa. Es importante que estas oscilaciones decaigan completamente antes de que comience a contar el tiempo en el punto de inicio. La campana debe estar

adecuadamente balanceada y deslizarse suavemente, de modo que las fluctuaciones de la presión dentro sean insignificantes.

Se necesita conocer la temperatura y la presión del gas colectado al completarse el ciclo de colección. La presión es medida y promediada en el período completo de este ciclo, ya que las variaciones de la presión debido al cambio de posición de la campana son pequeñas y el promedio sirve para filtrar cualquier ruido en las mediciones. Sin embargo, se usa la última medición de temperatura tomada antes de completar la colección. Esto es debido a que, a altos flujos, la variación de la temperatura llega hasta 0,15 K (0,05 %). La temperatura del gas colectado es medida con un sensor insertado en la parte superior, la presión del gas bajo la campana es medida con un transductor de presión absoluto conectado a una llave en la tubería de entrada (Anexo 1), y se mide el tiempo de colección con un temporizador electrónico.

Además de flujo la campana gasométrica permite medir el volumen de gas desplazado durante la calibración conociendo su volumen de colección. Este es determinado por mediciones físicas a la campana gasométrica, según el método de encintado, de botella de pie cúbico u otros. Ha sido planteado por Wright (2001) que en la actualidad es más común operarla como dispositivo medidor de flujo que como medidor de volumen.

Las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 que se encuentran en Cuba se utilizan en la verificación de contadores de gas de uso doméstico, mediante la comparación del volumen de aire medido por las campanas gasométricas y el registrado en el contador, de acuerdo con la Norma cubana NC 1006:2020 (Oficina Nacional de Normalización, 2020). Cuando la campana baja, el gas fluye a través de la tubería de conexión al contador, siendo utilizado el volumen

en ella como referencia durante la detección del error de los contadores de gas de uso doméstico. De lo planteado hasta aquí se deriva la necesidad de comentar algunos métodos de calibración de campanas gasométricas existentes.

1.2 Métodos de calibración tradicionales

La campana gasométrica se calibra determinando su volumen. Este volumen comenzó a ser medido ya sea, por transferencia directa de volúmenes de aire conocidos de recipientes metálicos calibrados y denominados comúnmente botellas de pie cúbico (en la calibración por botella de pie cúbico) o mediante mediciones dimensionales directas de la campana gasométrica, utilizando una cinta de medición de acero diseñada para medir el diámetro exterior (en la calibración por encintado).

Por ejemplo, el procedimiento que reporta el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST, *National Institute of Standards and Technology*) de los Estados Unidos para calibrar las campanas gasométricas consiste en encintarlas para obtener el volumen exterior a través del diámetro promedio y, seguidamente, obtener el volumen interno sustrayendo el volumen del metal en la pared de la campana. Esto se debe a que la pared tiene determinado espesor que debe ser considerado.

A continuación, se explican los métodos de calibración tradicionales.

1.2.1 Calibración por botella de pie cúbico

Por varias décadas fue una práctica universal calibrar las campanas gasométricas por el método de calibración por botella de pie cúbico. Esto significa transferir un pie cúbico de aire entre una botella patrón (recipiente

metálico patrón) y la campana gasométrica. Dicho procedimiento fue descrito en 1926 en una publicación de Buró Nacional de Patronos (E.E.U.U.) y se volvió tan tradicional que por largo tiempo no se prestó mucha atención a la posibilidad de encontrar otros y quizás mejores métodos. Los primeros trabajos se realizaron en unidades del sistema inglés, por lo que frecuentemente se le llama calibración por botella de pie cúbico.

En la industria del gas se empleó para calibrar campanas gasométricas. Un dispositivo consistente en un recipiente metálico, denominado comúnmente botella, de níquel o de cobre, previamente calibrado y recubierto en cromo, se abría al final de su cuello inferior y se bajaba a un tanque con un líquido sellante, usualmente aceite ligero de baja presión de vapor, como se muestra en el Anexo 2. Mientras el líquido entraba por el fondo y llenaba el interior hasta la marca de graduación en el vidrio indicador en el cuello superior de la botella, un volumen de aire se desplazaba y fluía a través de un tubo conector a la campana que se elevaba.

La transferencia de aire podía ser a través de la botella que descendía a la campana que se elevaba, o de la campana que descendía a la botella que se elevaba. En cada caso, los resultados debían ser aproximadamente los mismos, excepto por la ligera diferencia en el comportamiento del líquido sellante. Una cantidad residual queda en las paredes del instrumento que había estado en una posición alzada antes de descender, mientras que la superficie que se eleva del otro carga líquido adherido hacia arriba. Como el área de superficie total involucrada de la campana no será la misma que la de la botella, no es de esperarse una duplicación perfecta del comportamiento entre los dos casos.

Las transferencias podían hacerse con el sistema bajo presión normal de la campana o con los contrapesos ajustados para equilibrar la campana a presión atmosférica. Para cada pie cúbico de aire que se pasaba hacia adentro o hacia afuera de la campana, esta se colocaba primero en una posición, manipulando la válvula rotatoria deslizante, de modo que la prueba comenzara en una marca de pie cúbico en la escala de la campana. Si la escala, el patrón y el procedimiento hubieran sido perfectos, la siguiente marca de pie cúbico hubiera sido exactamente la de la campana gasométrica al final de la prueba. La diferencia entre un pie cúbico y el volumen indicado en la escala era el error determinado en la calibración. Este procedimiento se repetía para medir sucesivos incrementos de pie cúbico hasta su rango completo (Collet, 1972).

Se utilizaba, además, otro dispositivo similar llamado *Patrón de pie cúbico de Stillman* para la calibración de la campana gasométrica (Anexo 2). Este dispositivo consistió en una campana transportable que se elevaba y descendía en un tanque anular. La campana era guiada por una columna central vertical que se deslizaba en un cilindro cerrado, y su movimiento hacia arriba estaba limitado por un tope ajustable. Este patrón tan exacto como una botella de pie cúbico ofrecía la ventaja adicional de ser fácilmente transportable.

Ambos dispositivos se consideran patrones volumétricos que realizan la calibración desplazando un volumen de aire. Drenando el aceite de sellaje de ella, y colocándola en su maleta, el usuario podía transportarla fácilmente de un lugar a otro. Era bastante fácil montarla y ponerla en servicio, excepto que se requería un período de algunas horas para que la temperatura del patrón se estabilizara y se hiciera igual a la de la campana gasométrica a comprobar. Por su portabilidad y pequeño tamaño comparado con una botella de pie cúbico en

un tanque de inmersión, tenía sus ventajas. Como la botella de pie cúbico, podía ser enviada a calibración.

1.2.2 Método de encintado

Hasko (1975) asume que el método de encintado es un método de calibrar una campana gasométrica determinando la relación entre el volumen desplazado y el movimiento lineal de la campana por medio de la medición de la longitud de la escala, la circunferencia de la campana y el desplazamiento del líquido de sellaje. Como una cinta de acero se pasa alrededor del perímetro de la campana el procedimiento se conoce como encintado.

El procedimiento de encintado se ilustra en la Figuras 2 que muestra la sección transversal de una campana gasométrica. Se denomina volumen exterior a su volumen interno más el volumen del metal de la campana.

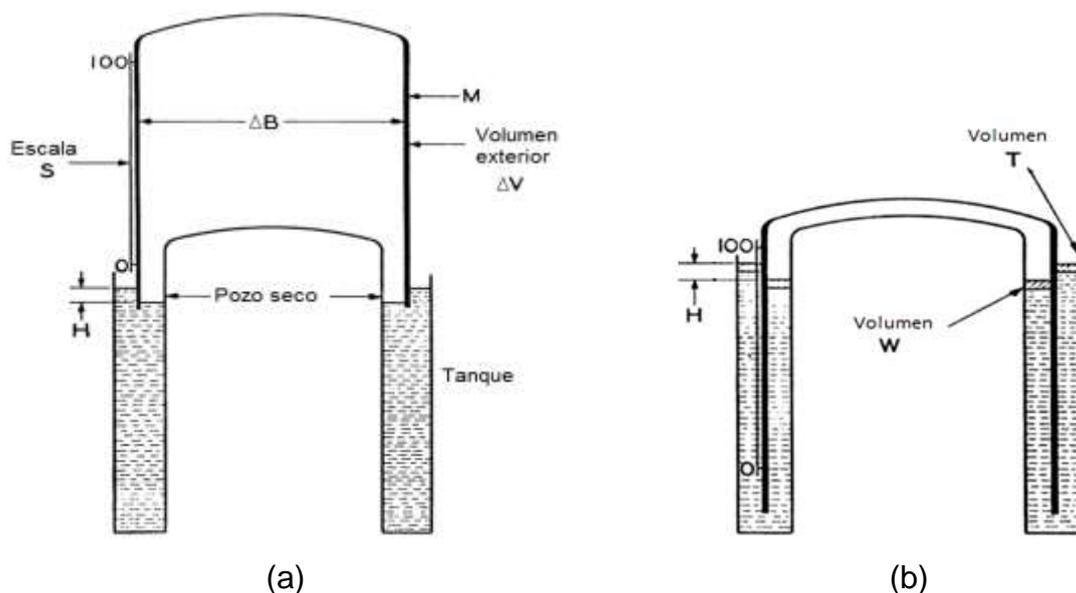


Figura 2. Campana gasométrica:
(a) en el 0 de la escala; (b) en el punto 100 de la escala.

Fuente: Hasko (1975, pág. 7)

Cuando una campana gasométrica se baja de una posición a otra, el volumen del gas descargado se halla por la siguiente ecuación:

$$Q = \Delta V + S - T \quad \text{Ec. 3}$$

Donde Q es el volumen de gas descargado por la campana gasométrica, ΔV es la variación en el volumen exterior de la campana por encima de la superficie del líquido al pasar de la primera posición a la segunda, S es el volumen de la escala, T es el volumen del líquido que se eleva entre el tanque principal y la pared de la campana causado por el metal de la campana y la escala.

La Figura 2(a) ilustra la posición de la campana en el 0 de la escala, con una presión interna representada por la diferencia en niveles del líquido de sellaje dentro y fuera de ella, designada por H . Mientras la campana desciende a la posición 100, como se muestra en la Figura 2(b), si no hubiese variación en el nivel del líquido de sellaje, el volumen del gas descargado, Q , es igual sólo a la variación del volumen interior de la campana, ΔB , por encima de la superficie del líquido. Sin embargo, el nivel de la superficie del líquido en el espacio anular entre el tanque principal y el exterior de la campana, y en el interior de la campana se eleva porque algún líquido es desplazado por el metal de sus paredes y de la escala. El volumen del líquido que se eleva en el interior de la campana, W , desplaza gas y por lo tanto contribuye al volumen del gas, Q , que se descarga. Por lo tanto:

$$Q = \Delta B + W \quad \text{Ec. 4}$$

La variación del volumen interior, ΔB , es igual a la variación en el volumen exterior, ΔV , menos el volumen del metal que se sumerge, M , por lo tanto:

$$\Delta B = \Delta V - M \quad \text{Ec. 5}$$

El volumen del metal sumergido, M , más el volumen del metal sumergido de la escala, S , es igual al volumen del líquido que se eleva en el interior de la campana, W , más el volumen del líquido que se eleva entre la superficie exterior y el tanque principal, T . Por lo tanto:

$$M + S = T + W \quad \text{Ec. 6}$$

Sustituyendo la Ec. 5 en la 4

$$Q = \Delta V - M + W \quad \text{Ec. 7}$$

Reordenando la Ec. 6

$$M = T + W - S \quad \text{Ec. 8}$$

Sustituyendo la Ec. 8 en la 7 se obtiene la ecuación del método (Ec. 3).

ΔV se obtiene midiendo la circunferencia con una cinta calibrada de acero, determinando la distancia vertical que recorre la campana, midiendo la distancia entre las marcas de graduación de la escala y, entonces, calculando el volumen. Existe una cinta de medición que permite al técnico leer directamente el diámetro de un objeto cilíndrico, teniendo en cuenta el espesor de la cinta, también conocida como cinta de diámetro o cinta pi.

Los fabricantes aseguran que las campanas gasométricas son bastante cilíndricas, con circunferencias que no se desvían $\pm 0,8$ mm de una circunferencia de referencia. Los planos correspondientes a la intersección de la superficie del líquido con la campana deben ser observados y la circunferencia debe ser medida en estos puntos.

El volumen del líquido que se eleva en el tanque se calcula a partir del cambio en el nivel de la superficie y de las dimensiones de la campana y del tanque. Las lecturas del nivel del líquido deben ser hechas cuidadosamente usando un

micrómetro de profundidad firmemente sostenido e inamovible en una superficie superior plana del tanque.

Para que la Ec. 3 sea rigurosamente verdadera, se deben satisfacer dos requerimientos. Primero, la campana y el contrapeso deben ser ajustados para asegurar que la presión dentro de la campana gasométrica sea la misma en cualquier posición como las vistas en las Figuras 2(a) y 2(b). Lo cual puede ser chequeado conectando un manómetro inclinado para indicar la presión interna. Otro procedimiento consiste en abrir el interior a la atmósfera por medio de una válvula rotatoria, ajustando los contrapesos hasta que esta permanezca estacionaria en cualquier posición, y realizar la calibración en esas condiciones. En segundo lugar, no debe haber líquido adherido o drenando de las paredes, una condición que prácticamente nunca se alcanza.

Además de los métodos tradicionales de calibración de las campanas gasométricas se han desarrollado otros más recientes.

1.3 Métodos recientes para la calibración de las campanas gasométricas

Con el decurso del tiempo han surgido métodos alternativos de calibración para las campanas gasométricas. Seguidamente se mencionan algunos de ellos.

1.3.1 Rastreador láser

Kusmenko y Samoylenko (2015) implementaron un método de medición de las dimensiones geométricas de los instrumentos 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 contadores de agua y de gas. Su trabajo abarcó también una

campana gasométrica. Para la medición de la campana de 0,7 m de diámetro y 1,2 m de longitud esta se situó horizontalmente y fue fijada sobre una cuña montada en 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. La utilización de este permitió disminuir significativamente la influencia de la temperatura del operador sobre la campana gasométrica. Durante el análisis se utilizó un rastreador láser de marca Faro ION con las siguientes características metrológicas:

El esquema general de medición se representa en el Anexo 3. El rastreador láser realiza la observación automática del reflector, construido en forma de esfera especial de diámetro 3,8 cm, en el centro del cual se realizan mediciones angulares y lineales. Con ayuda del rastreador se realiza la medición de distancia S_i , de los ángulos horizontales N_i y verticales Z_i . El cálculo de los valores medidos de la distancia y ángulos de las coordenadas espaciales de los puntos de referencia se utiliza para la introducción del sistema rectangular de coordenadas en la memoria del rastreador. Para ello, además del cálculo de las coordenadas de los puntos de referencia en la superficie se calcula el diámetro del reflector esférico.

Mediante un procesamiento de los resultados de medición se logra:

- la evaluación de los parámetros geométricos de la superficie de la campana por medio de sus coordenadas espaciales con ayuda del método de mínimos cuadrados (MMC),

- la evaluación de la incertidumbre de determinación de los parámetros geométricos de la superficie de la campana con ayuda del MMC,
- el cálculo de la capacidad de la campana (calibración) utilizando los parámetros geométricos encontrados y la forma real de la campana y
- la evaluación con ayuda del MMC de la incertidumbre de los intervalos de capacidad de la campana en base a la determinación de la incertidumbre de los parámetros geométricos de la superficie del objeto.

Aunque Kusmenko y Samoylenko (2015) no reportan el valor de la incertidumbre expandida final, ellos reportan como fuentes de incertidumbre la determinación del radio promedio de la campana con el rastreador láser, los defectos de fabricación de la superficie de la campana y si no se conoce la inclinación real del eje de la campana cuando está suspendida su efecto en la incertidumbre del volumen de la campana debe ser incluido.

El Instituto Nacional de Metrología de China en el 2010 también reportó haber calibrado una campana gasométrica por el método de rastreador láser (Cui Lishui, 2010). En este caso se trató de una campana de 1 m^3 . Un rastreador y un interferómetro láser fueron utilizados para medir el volumen de la campana. La incertidumbre expandida del resultado resultó menor de $0,1 \%$ (Cui Lishui, 2010). En este caso las fuentes de incertidumbre provinieron de la medición del diámetro de la campana con el rastreador láser, de la altura de la campana con el interferómetro y sensores óptico-eléctricos y la relación entre la temperatura dentro de la campana y el coeficiente de dilatación.

1.3.2 Encintado y por máquina de medición por coordenadas

En el método de encintado se utiliza una cinta especial (conocida como cinta pi (cinta de diámetro), de cuya escala de medición se obtiene directamente el diámetro externo del artefacto como se muestra en el Anexo 4 (Schwenk, 2021). Alternativamente, el diámetro interior de la campana puede medirse usando una máquina de medición por coordenadas de tamaño conveniente (Maldonado & Gervacio, 2004). Esto lo hace diferente al método de encintado tradicional que considera solo el uso de la cinta de medición. Ambas técnicas dimensionales logran trazabilidad a la unidad SI de longitud.

También en Canadá se certifican dimensionalmente campanas gasométricas de volúmenes 2, 5, 10, 20 y 50 ft³ (en unidades del sistema inglés vigente en este país), por el método de encintado usando cintas pi calibradas por el *National Research Council* o el *NIST* (*Government of Canada*, 2021).

Al combinar el diámetro promedio de la campana y la constante del desplazamiento vertical (pulsos por milímetro), se puede obtener la constante de calibración, según la Ec. 9:

$$K = \frac{K_L}{A} = \frac{4 \cdot K_L}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde K_L es la constante del desplazamiento vertical, A área de la sección transversal de la campana y D el diámetro interno.

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) para este método realiza la calibración del desplazamiento vertical con un interferómetro láser y se contabiliza el número de pulsos generado por el *encoder* en un determinado desplazamiento vertical de la campana lográndose determinar de esta forma K_L (Maldonado & Gervacio, 2004).

La calibración de la campana gasométrica consiste básicamente en la determinación de la constante de calibración K . El CENAM reporta que es

necesario determinar la constante de calibración K , no sólo por ser una constante de proporcionalidad entre el volumen desplazado y la cantidad de pulsos emitidos por el *encoder* durante dicho desplazamiento, sino porque cuando se utiliza la campana gasométrica para determinar los factores de corrección f_c de un flujómetro de gas se utiliza el siguiente modelo matemático:

$$f_c = \frac{V_{PN}}{V_{mN}} = \frac{\left(\frac{C}{K}\right) Z_m T_m P_p}{V_m Z_p T_p P_m} \quad \text{Ec.10}$$

Los subíndices **p** y **m** se refieren al patrón y al flujómetro bajo calibración, respectivamente, V_{PN} y V_{mN} corresponden al volumen en condiciones normalizadas, Z_m y Z_p al factor de compresibilidad, T_m y T_p a la temperatura absoluta, P_m y P_p a la presión absoluta, V_m es el volumen del flujómetro, C es el total de pulsos generados por el *encoder*, K es la constante de calibración de la campana gasométrica, en pulsos por unidad de volumen y f_c representa el factor de corrección del flujómetro bajo calibración.

Con el objetivo de lograr disminuir la incertidumbre de medición del volumen desplazado, de mejorar las condiciones de calibración del sistema de medición de desplazamiento vertical de la campana gasométrica y de ampliar las capacidades de calibración del patrón nacional de longitud, el CENAM reporta haber implementado una regla lineal (*encoder* lineal) en lugar del generador del tipo rotativo (Mercado & Maldonado, 2020), aunque aún es necesario para la calibración de la campana utilizar el método de encintado, la máquina de medición por coordenadas o el método de desplazamiento que se verá en el epígrafe 1.3.5.

1.3.3 Brazo con sensores de distancia

Benkova, y otros (2011) reportaron la calibración de la campana gasométrica mediante otro método geométrico similar al empleado por Mickan & Kramer

(2009). Se plantea que la calibración incluye la determinación de las dimensiones geométricas internas de la campana gasométrica en 110 niveles horizontales (Anexo 5). También los instrumentos instalados en ella fueron calibrados. De ese modo, una estructura especial fue fabricada para centrar un dispositivo de medición dentro de la campana y adjuntarle un brazo de medición con sensores de distancia. La plataforma de esta estructura (posición 6) donde se sujetó el brazo fue equipada con un motor paso a paso para desplazamientos de hasta 180°.

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 el 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. El intervalo de tiempo de un ciclo fue de aproximadamente 12 horas y cada ciclo fue repetido tres veces. Utilizándose el brazo con sensores de distancia son calculadas las áreas de la campana en cada sección transversal de los valores medidos y son utilizadas para determinar el volumen de la campana.

1.3.4 Método gravimétrico

Entre los métodos que se aplican en la calibración de campanas gasométricas, se encuentra el método gravimétrico (Pavlovic, Kozmar, & Šunić, 2008). Estos

autores realizaron la calibración de la campana gasométrica y los flujómetros de gas en un rango de hasta 1,4 m³/h con el método gravimétrico. Su equipamiento es directamente trazable a las unidades fundamentales de masa y tiempo y presenta incertidumbres bajas.

El sistema de medición del método gravimétrico se muestra en el Anexo 6 y consiste en que el aceite abandona el contenedor cerrado y es recogido 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 es obtenido a partir del pesaje.

Se llevaron a cabo correcciones para la fuerza de empuje del aire y de los gradientes de temperatura en el aceite y en el aire. Las variaciones de temperatura en el laboratorio no fueron mayores de 0,5 °C. En resumen, los principales componentes del sistema son la campana gasométrica, un flujómetro de transferencia, un contenedor cerrado y un tanque abierto en la balanza (Anexo 6).

Utilizando el sistema de medición puede realizarse la calibración de la campana gasométrica o la calibración del flujómetro de gas de transferencia. El procedimiento de medición es prácticamente el mismo para ambos. La presión medida respecto a la presión atmosférica, en lo adelante presión manométrica, en la campana gasométrica es aproximadamente 1,2 kPa.

1.3.5 Método de desplazamiento

En el 2004 la unidad 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 gasométrica

modelo FTBP-05 con un volumen de desplazamiento de aproximadamente $0,14 \text{ m}^3$ como se muestra en el Anexo 7 (Maldonado & Gervacio, 2004). Su desplazamiento vertical era medido a través de un *encoder* rotatorio (dispositivo de generación de pulsos). Con este patrón se podía dar trazabilidad a los resultados de medición de equipos de medición de flujo de gas cuya señal de salida fuera digital o analógica (tipo turbina, toberas, vórtex, de flujo laminar, rotativos, tipo diafragma, entre otros).

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

Con el objetivo de obtener la constante de calibración K se emplea el método de desplazamiento de agua (*waterdraw*), donde se utiliza un recipiente volumétrico patrón (pipeta), que se interconecta con la campana gasométrica. El arreglo de interconexión se diseñó con la finalidad de que las diferencias de presión entre la campana y el recipiente auxiliar fueran despreciables como se observa en el Anexo 7. La calibración del recipiente volumétrico patrón 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 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 .

El recipiente volumétrico patrón utilizado era de 20 L, fabricado en acero inoxidable con acabado superficial interno tipo espejo y sensor de temperatura integrado; su volumen se definía por rebosamiento y para el llenado y vaciado contaba con una válvula de tres vías en la parte inferior. En uno de los puertos se conectaba el suministro de aceite y en el otro se instalaba un tubo de vidrio con una forma tal que permitía se generase una columna de aceite al vaciar la pipeta. La altura de la columna de aceite que se generaba era función de la presión interna de la campana gasométrica de manera que al igualarse la presión interna de la campana gasométrica con la columna de aceite la campana detenía su movimiento y se podía contabilizar el número de pulsos generados. Es de destacar que la formación de la columna de aceite en la parte inferior de la pipeta fue de vital importancia para obtener una buena repetibilidad en el número de pulsos generados por el *encoder*.

Las condiciones ambientales jugaron un papel muy importante en el proceso de la calibración, tanto en lo que se refiere a la determinación de la masa de aceite como en la determinación de la constante de calibración K de la campana gasométrica. La temperatura fue la magnitud que más influyó en el proceso de calibración, porque el método de calibración supuso que la temperatura del gas contenido en la campana gasométrica era la misma que cuando pasaba al interior de la pipeta. Diferencias de temperatura entre campana gasométrica y pipeta mayores que 0,3 °C podían amenazar seriamente la repetibilidad de los valores para K .

La presión del gas se midió en el interior de la campana gasométrica y se asumió que era la misma en el interior del recipiente volumétrico patrón cuando estaba vacío. Adicionalmente se midió la presión atmosférica. La humedad del aire se midió colocando sensores en posiciones adyacentes a la campana. Finalmente, el modelo matemático usado para calcular K , a partir de las mediciones de volumen en el recipiente auxiliar resultó.

$$K = \frac{C}{V_P \cdot (1 + \alpha_C \cdot (T_C - 20))} \quad \text{Ec. 11}$$

$$V_P = V_{20} \cdot (1 + \alpha_P \cdot (T_P - 20)) \quad \text{Ec.12}$$

Donde C es el número de pulsos generados, [pulsos]; V_P es el volumen de la pipeta a T_P , [L]; T_P es la temperatura de la pipeta vacía después de realizar la prueba, [°C]; α_C es el coeficiente de dilatación lineal del material de fabricación de la campana, [1/°C]; T_C es la temperatura en la campana gasométrica, [°C]; V_{20} es el volumen de la pipeta a 20 °C, [L] y α_P : es el coeficiente de dilatación cúbico del material de fabricación de la pipeta, [1/°C].

El método de desplazamiento ha sido empleado por otros autores (Tabla 1), con diferentes proporciones entre el volumen de la campana y el recipiente volumétrico patrón.

Tabla 1 Utilización del método de desplazamiento con diferentes volúmenes y proporciones.

Volumen nominal (dm ³)		Proporción	Autores
Recipiente Patrón	Campana gasométrica		
50	500	10	Hernández Apaceiro y Espinosa Delgado (2006)
25	200	8	Szewczyk, Krejsa, Nowicki, y Ostaszewska (2020)
20	140	7	Maldonado y Gervacio (2004)

En Cuba se reporta la utilización del método de desplazamiento para la calibración de la campana gasométrica Marca SAMGAS, $V_{\text{nominal}} = 500 \text{ dm}^3$ (Hernández Apaceiro & Espinosa Delgado, 2006). Este instrumento se calibró con un recipiente volumétrico patrón, con una capacidad nominal de 50 dm^3 con una incertidumbre expandida con $k = 2$, $U = 0,026 \text{ dm}^3$. Este método continúa empleándose para calibrar este modelo.

1.3.6 Contador de gas de referencia de desplazamiento rotatorio

Tonkonogij y otros (2015) reportaron un nuevo método de calibración de la campana gasométrica, cuyo objetivo es evaluar el vínculo entre el volumen desplazado de aire dV_{air} y el desplazamiento de la campana dH . El volumen de aire desplazado a la temperatura y la presión durante la calibración es igual a la variación de volumen de la parte no sumergida de la campana dV_{camp} . El carácter de este vínculo es lineal. El coeficiente de enlace es $k_v = \frac{dV_{\text{camp}}}{dH}$

que especifica el valor de aire desplazado por unidad de desplazamiento de la campana. En un caso ideal el coeficiente k_v es igual a la sección transversal de la campana. Sin embargo, debido a que la sección transversal varía ligeramente con la altura por las imperfecciones del proceso de fabricación, se produce una variación del coeficiente k_v . Del mismo modo, la variabilidad de la presión en la campana gasométrica afecta al coeficiente k_v . 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 (Fillmer & Fillmer, 1990). 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 el Anexo 8. Para la medición del volumen de gas se utilizó un contador de gas de tipo rotatorio A-DUO, cuyo tamaño dependía del tamaño de la campana. Este contador poseía buena repetibilidad y estaba calibrado con una incertidumbre entre (0,1 y 0,12) %.

Con el objetivo de disminuir la incertidumbre de calibración, el número de pulsos de la señal de desplazamiento de la campana gasométrica para cada volumen de aire registrado no debe ser menor que 10^4 . Esto significa, que el número de pulsos concerniente al desplazamiento completo de la campana debe ser del orden de (2 a 3) $\times 10^6$. En particular, se usa el *encoder* tipo A90H de la compañía PRECIZIKA METROLOGY, 450 000 pulsos en una revolución. Además de los pulsos del contador rotatorio y de la campana gasométrica, son medidas las temperaturas y presiones para la conversión de volumen. Todas las mediciones son sincronizadas con respecto a los pulsos del contador de gas rotatorio registrándose el tiempo de cada medición.

Es importante conocer la variación de la presión manométrica con el desplazamiento de la campana gasométrica para diagnosticar las condiciones técnicas de la misma. Esta presión debe ser medida con un transductor de presión de respuesta rápida. Fue usado un transductor de presión DP103 tipo membrana de fabricante VALIDYNE. Se logró determinar la distribución del flujo y el volumen específico (muy relacionado con la sección transversal de la

campana) procesando los resultados de medición. Este método ofrece una incertidumbre de calibración entre (0,12 a 0,15) %.

El método de contador de gas de referencia de desplazamiento rotatorio permite obtener una distribución de parámetros importantes a medida que se desplaza la campana. La evaluación del volumen específico desplazado es llevada a cabo teniendo en cuenta no solo las secciones transversales de la campana, sino también la distribución de la presión. Este método permite el diagnóstico de condiciones técnicas de la instalación y su perfección técnica.

1.3.7 Método de tobera de flujo crítico

Una tobera sónica es un medidor de flujo convergente-divergente. En estos dispositivos existe una correlación entre el flujo másico y la presión diferencial a través de la restricción (área mínima de la garganta de la tobera). 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 flujo másico de aire que pasa a través de ella se calcula con la siguiente expresión.

$$q_{m_{tob}} = \frac{\pi \cdot d_g^2 \cdot C^* \cdot C_d \cdot p_o}{4 \cdot \sqrt{\frac{R}{M_a \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]} \cdot T_o}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde 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⁻¹·K⁻¹] es la constante universal de los gases, x_v es la fracción molar del vapor de agua, M_v [kg/mol] es la masa molar del agua, M_a [kg/mol] es la masa molar del aire seco, T_o [K] es la temperatura de estancamiento y $q_{m_{tob}}$ [kg/s] es el flujo másico en la tobera.

En Cuba en 2009 fue empleada la tobera de flujo crítico por especialistas extranjeros para la calibración del volumen de la campana gasométrica SAMGAS, modelo 500 dm³ ubicada en el Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de la Unión Cuba-Petróleo (Anexo 9). La calibración de la campana gasométrica utilizando la tobera de flujo crítico consiste en obtener el volumen que esta tiene entre dos graduaciones: lectura inicial, L_i y lectura final L_f de la escala lineal.

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

$$q_{m_{tob}} = \frac{\rho_c \cdot V_c}{\Delta t} \quad \text{Ec. 14}$$

Sustituyendo la Ec. 13

$$V_c = \frac{\Delta t \cdot q_{m_{tob}}}{\rho_c} = \frac{\Delta t \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_g^2 \cdot C^* \cdot C_d \cdot p_o}{4 \cdot \sqrt{M_a \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]^{T_o}}} \right)}{\rho_c} \quad \text{Ec. 15}$$

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

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

$$V_{20} = V_c \cdot [1 + 3\alpha \cdot (20 - T_c)] \quad \text{Ec. 16}$$

Donde T_c [°C] es la temperatura del aire en la campana gasométrica, V_c [L] es el volumen de la campana gasométrica en las condiciones de la calibración, V_{20}

[L] es el volumen de la campana gasométrica a temperatura de 20 °C y α [1/°C] es el coeficiente de dilatación lineal del material de la campana gasométrica.

El estudio de los diferentes métodos de calibración de las campanas gasométricas y su funcionamiento realizado permite llegar a las conclusiones siguientes:

Las campanas gasométricas utilizadas hoy a nivel mundial comparten una base teórica similar y su uso está basado en la ecuación de conservación de la masa, aunque a veces varía la dirección del flujo, que puede ser saliente o entrante. Numerosas fuentes de incertidumbre están presentes en la calibración de flujómetros de gas usando la campana gasométrica, sin embargo, para evaluarlas es necesaria la calibración de esta.

En todos los métodos tratados, se recomienda mantener la calibración periódica de los sensores de presión, humedad relativa y temperatura. Esto 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 ella se realiza bajo límites previstos de estas magnitudes.

Capítulo 2 Diagnóstico y selección del método de calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100

En este capítulo se expone la caracterización de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 del Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de la Unión Cuba Petróleo (CUPET), el diagnóstico realizado y la propuesta del método de calibración idóneo para ambas.

2.1 Caracterización de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100

Las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100, que se encuentran en el Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET, se muestran en las Figuras 3 y 4 junto a contadores domésticos de gas.



Figura 3. Campana gasométrica LJQ-20 y contadores domésticos de gas



Figura 4. Campana gasométrica LJQ-100 y contadores domésticos de gas.

En las Tablas 2 y 3 se muestran las características relevantes las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100, según las especificaciones reportadas por el fabricante Hangzhou TNMA *Measure Technology Co.*

Tabla 2 Indicadores de operación y especificaciones de la campana gasométrica LJQ-20.

Indicadores	Especificaciones
Incertidumbre de medición	0,5 % (k = 2)
Flujo	0,016 m ³ / h a 1,2 m ³ / h
Presión de trabajo	≥1 kPa (puede ser ajustada)
Tipo de contadores de gas con que trabaja	G1.6 hasta G4
Volumen nominal de la campana	20 L
Tamaño y peso de la campana gasométrica	(550×400×1500) mm Peso bruto: 70 kg (incluido líquido de sellaje)

Tabla 3 Indicadores de operación y especificaciones de la campana gasométrica LJQ-100.

Indicadores	Especificaciones
Incertidumbre de medición	0,5 % (k = 2)
Flujo	0,1 m ³ / h a 6 m ³ / h
Presión de trabajo	≥1 kPa (puede ser ajustada)
Tipo de contadores de gas con que trabaja	G1.6 hasta G4
Volumen nominal de la campana	100 L
Tamaño y peso de la campana gasométrica	(1000×900×2950) mm Peso bruto: 400 kg (incluido líquido de sellaje)

2.2 Diagnóstico de la situación

El diagnóstico centró su atención en el conocimiento de la situación actual que presentan las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 del Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET. Para ello, se emplearon las técnicas de análisis el contenido de los documentos, la observación *in situ* y la medición.

La norma cubana NC 1006:2020 (Oficina Nacional de Normalización, 2020) plantea que el error máximo permitido en los contadores de gas clase 1,5 en verificación inicial a $Q_{m\acute{a}x}$ y a $0,2 Q_{m\acute{a}x}$ será de $\pm 1,5 \%$ y a $Q_{m\acute{i}n}$ será de $\pm 3 \%$. A su vez la norma internacional *OIML R 137-1&2:2012* (International Organization of Legal Metrology, 2012) refiere que la incertidumbre expandida en la determinación de los errores de la cantidad de gas medido debe ser menor que un tercio del error máximo permitido.

Lo expuesto en las dos normas se tomó en cuenta para asegurar que, con una incertidumbre de calibración menor de 0,5 % en la campana de 100 L y menor

de 1 % en la campana de 20 L, ambas campanas gasométricas estarían aptas para la calibración de metros contadores.

La norma china *JJG 165-2005 Verification Regulations of Standard Bell Provers of Gas Flow* (State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2005) estipula cuales serían los instrumentos de medición a utilizar, el modelo matemático para determinar el volumen, el número de mediciones para cada variable, las condiciones ambientales y como determinar los parámetros metrológicos para el método de encintado.

El manual *Examination of Vapor-Measuring Devices for Liquefied Petroleum Gas* (Hasko, 1975) explica como se realiza la determinación del diámetro del tanque.

El documento Gestión de la documentación. Procedimiento general. PG 01 (Valdés Pereira, 2014) estipula cuál debe ser la estructura de las instrucciones de calibración del INIMET (Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología), su contenido y los pasos para su elaboración, sirviendo de apoyo para la elaboración de la instrucción de calibración.

Sobre la base del análisis de los documentos mencionados se elaboraron los presupuestos de la estimación de la incertidumbre para el volumen, tomándose en cuenta el aporte a la incertidumbre de todas las variables medidas y los coeficientes de sensibilidad, algo que no contienen de manera explícita los documentos.

Para la observación *in situ*, se visitó el Laboratorio de Verificación de Contadores de Gas de CUPET, con el fin de observar las condiciones ambientales del lugar, el estado físico de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 y la evidencia de si fueron calibradas o no. Además, se

observó si se estaban utilizando en este momento. Para ello, se empleó la Guía de Observación del Anexo 10.

1. Condiciones ambientales del lugar dónde se encuentran las campanas

El laboratorio tiene un aire acondicionado, sin embargo, se han observado temperaturas entre 25 °C y 30 °C en verano, por lo que se sugiere se debe mejorar la climatización. La humedad relativa se mantiene de (30 a 80) % y la presión atmosférica de (86 a 106) kPa. Esto se observó ya que el laboratorio cuenta con un termo-higrómetro (Resolución de la escala de temperatura = 1 °C, Resolución de la escala de humedad relativa = 1 %) y la presión atmosférica es medida por un sensor de la campana LJQ-100 (Resolución = 1 Pa).

2. El examen exterior del estado físico de las campanas mostró que las campanas gasométricas son de un material metálico y anticorrosivo, su superficie no presenta arañazos ni abolladuras y sus soldaduras son pulidas y uniformes. La placa de escala está instalada paralela a la línea central de la campana y la escala es uniforme y clara. La campana, el canal artificial y el pilar guía están en posición vertical respecto a la superficie del fondo. Las válvulas son capaces de girar y no hay presencia de goteo de líquido que indique filtraciones, ni se detectan fugas. Se utiliza aceite como líquido de sellado. Tienen una placa de identificación con número de serie 140924 en la campana de 20 L y 140923 en la de 100 L. De hecho, en ambas se indica modelo, clase de exactitud, volumen nominal, flujo máximo, presión de trabajo y el nombre del fabricante.

3. Se prestó atención al hecho de que en la actualidad no se utilizan por no tener trazabilidad metrológica, ya que no presentan certificado de calibración, sino certificados de verificación emitidos por el Instituto Provincial de Metrología de Zhejiang.

Mediante la medición se determinaron, de manera cuantitativa, el diámetro y altura de las campanas, el diámetro de los tanques, las diferencias de alturas de líquido, el ancho y espesor de placa de escala (Tabla 4). Para ello, se utilizaron una cinta de medición (Resolución = 1 mm) y una regla (Resolución= 1 mm) con el objetivo de proponer los instrumentos de medición para la calibración de las campanas gasométricas y elaborar los presupuestos de incertidumbre preliminares.

Tabla 4. Resultados de las mediciones

Parámetros	Campana gasométrica		Incertidumbre
	LJQ-20	LJQ-100	U, k=2
Diámetro de la campana	25,8 cm	43,0 cm	0,1 cm
Diámetro del tanque	29,2 cm	47,1 cm	0,3 cm
Desplazamiento	19,4 cm	51,0 cm	0,1 cm
Diferencia de altura de líquido	0,4 cm	0,6 cm	0,1 cm
Ancho de la placa de escala	2,9 cm	3,0 cm	0,1 cm
Espesor de la placa de escala	0,1 cm	0,1 cm	0,1 cm

Los resultados de las mediciones mostraron la necesidad de adquirir dos cintas de diámetro de (200 a 330) mm y (300 a 620) mm, con Resolución= 0,05 mm) y el micrómetro de profundidad de (0 a 300) mm y Resolución= 0,01 mm. De

igual manera, los valores obtenidos contribuyeron a elaborar los presupuestos de incertidumbre preliminares.

2.3 Selección del método de calibración idóneo para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100

En el Capítulo 1 se realizó un estudio descriptivo de los métodos de calibración de las campanas gasométricas existentes. En este acápite se profundiza en el análisis crítico de los métodos presentados y sus posibilidades de aplicación en la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100, para seleccionar el método de calibración idóneo para ellas.

En la Tabla 5 se realiza un resumen de la comparación de todos los métodos analizados teniendo en cuenta doce categorías entre las que se mencionan: costos de la calibración en el mundo de hoy, facilidades de instalación del sistema de medición, garantía de trazabilidad, existencia de los patrones necesarios para la calibración, listado de equipos y precios del equipamiento auxiliar y otros insumos para la calibración, incertidumbre expandida relativa del método de calibración y otras.

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 y la utilización del Sistema Internacional de Unidades por la mayoría de los países. Igualmente sucede con el patrón de pie cúbico de Stillman. Además, las campanas gasométricas trabajan con valores en decímetros cúbicos o su equivalente en litros.

Tabla 5. Comparación de los métodos de calibración de campanas gasométricas

Categorías	Botella de pie cúbico	Rastreador láser	Encintado	Máquina de medición por coordenadas	Brazo con sensores de distancia	Gravimétrico	Desplazamiento	Contador de gas de referencia desplazamiento rotatorio	Tobera de flujo crítico
Costos en USD del servicio de calibración en el mundo de hoy	Sin información disponible	Sin información disponible	(\$119 a \$396)	Sin información disponible	Sin información disponible	Sin información disponible	\$396	Sin información disponible	Sin información disponible
Facilidades de instalación del sistema de medición	Surgirían problemas por diferentes sistemas de unidades.	Requiere desmontaje de la campana.	No requiere desmontaje de la campana ni de instalar componentes.	Requiere desmontaje de la campana.	Requiere desmontaje de la campana e instalación de componentes eléctricos y mecánicos.	Requiere instalación de componentes eléctricos y mecánicos. El sistema de medición resultante requiere de automatización.	Dificultad para encontrar los recipientes volumétricos patrones de tamaño adecuado.	Pueden surgir problemas de incompatibilidad entre la campana y el contador adquirido si se adquiere un modelo que no es el adecuado por su rango de flujo o EMP.	Pueden surgir problemas de incompatibilidad entre la campana y la tobera adquirida si se adquiere un modelo que no es el adecuado por su rango de flujo o EMP.
Garantía de trazabilidad en el país	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No

Categorías	Botella de pie cúbico	Rastreador láser	Encintado	Máquina de medición por coordenadas	Brazo con sensores de distancia	Gravimétrico	Desplazamiento	Contador de gas de referencia desplazamiento rotatorio	Tobera de flujo crítico
Existencia de los patrones necesarios para la calibración	No	No	Están disponibles en el país.	No	No	No	No	No	No
Completamiento y precio del equipamiento auxiliar y otros insumos necesarios para la calibración (lista de equipos y precios estimados, USD)	Patrón de pie cúbico. Sensores de temperatura, humedad y presión. No se define precio.	Rastreador láser, reflector esférico. <i>Encoder</i> fotoeléctrico o interferómetro láser, Sensores de temperatura y humedad. \$86 060	Calibrador vernier, regla metálica, micrómetro de profundidad y dos cintas de diámetro. <i>Encoder</i> fotoeléctrico, sensores de temperatura, humedad y presión. \$634	Máquina de medición de coordenadas. <i>Encoder</i> fotoeléctrico y sensores de temperatura y humedad. \$29 660	Estructura con brazo de medición, micrómetros digitales, motor paso a paso, computadora, <i>encoder</i> fotoeléctrico y un sistema de video. Sensores de temperatura y humedad. \$1 938	Contenedor cerrado, tanque abierto en la balanza, balanza, tanque de almacenamiento, bomba, desviador, válvula de control, <i>encoder</i> fotoeléctrico, contador de tiempo, computadora, y sensores. \$4 721	Dos Recipientes volumétricos patrón, depósito de aceite, aceite tipo dieléctrico y <i>encoder</i> fotoeléctrico (contador). Sensores de temperatura, humedad y presión. \$660	Contador de gas de referencia, sensores de temperatura, humedad, presión, <i>encoder</i> fotoeléctrico, contador de tiempo y computadora. \$2 676	Tobera sónica, sensores de temperatura, humedad, presión, <i>encoder</i> fotoeléctrico, válvula de aguja, sensor óptico conectado a un contador universal o cronómetro y bomba de vacío. \$828

Categorías	Botella de pie cúbico	Rastreador láser	Encintado	Máquina de medición por coordenadas	Brazo con sensores de distancia	Gravimétrico	Desplazamiento	Contador de gas de referencia desplazamiento rotatorio	Tobera de flujo crítico
Incertidumbre expandida relativa del método de calibración (%) k=2	0,1	Inferior a 0,1	(0,08 a 0,6)	Sin información disponible	(0,03 a 0,04)	Inferior a 0,17	(0,11 a 0,17)	(0,12 a 0,15)	(0,19 a 0,4)
Tiempo de calibración de las dos campanas	2 días	De (3 a 4) días	2 días	De (3 a 4) días	8 días	2 días	De (2 a 5) días	2 días	2 días
Posibilidades de automatización	Media	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Media
Dependencia de la tecnología	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Medio
Disponibilidad de documentación técnica y normativa.	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: Si	Artículos científicos: No Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: Si	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No	Artículos científicos: Si Documentación normativa: No

Categorías	Botella de pie cúbico	Rastreador láser	Encintado	Máquina de medición por coordenadas	Brazo con sensores de distancia	Gravimétrico	Desplazamiento	Contador de gas de referencia desplazamiento rotatorio	Tobera de flujo crítico
Fuentes de error, magnitudes de influencia (lista de fuentes, tipo de influencia)	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones Variación en la temperatura y presión Adherencia del aceite en las paredes de la campana y el patrón de pie cúbico.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Defectos de fabricación de la superficie de la campana. Inclinación real de su eje cuando está suspendida	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Adherencia del aceite en sus paredes.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Defectos de fabricación de su superficie. Adherencia del aceite en sus paredes.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Forma de la campana. Adherencia del aceite en sus paredes.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Variación en las condiciones ambientales y de medición.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Adherencia del aceite en sus paredes.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Variación de la presión dentro de la campana. Variación de la sección transversal de la campana.	Repetibilidad de las mediciones Características metro-lógicas y exactitud de los patrones. Relación entre la temperatura y el coeficiente de dilatación. Adherencia del aceite en sus paredes. Determinación del coeficiente de descarga y función de flujo crítico

El rastreador láser presenta la desventaja de requerir un desarme de la instalación de medición que podría dañarse al desmontar la campana. La importación del rastreador láser se dificulta, pues su precio es mayor de \$ 85 000 dólares, a lo que se suman los costos de importación. Además, no existe garantía a su trazabilidad, ni aseguramiento metrológico en el país. Lo mismo ocurre si se utiliza la máquina de medición de coordenadas.

Respecto al uso de un brazo con sensores de distancia, su empleo conllevaría dificultades como el desarme de la instalación, la importación de equipamiento de alta tecnología, costo y la trazabilidad metrológica quedaría fuera del país.

El uso del método gravimétrico implica gran cantidad de tiempo en la calibración y depende mucho de la tecnología. 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.

Respecto a la pertinencia del método de desplazamiento, se debe señalar que consume tiempo debido al goteo de la película de aceite de la superficie de la campana y el recipiente de referencia. Por ejemplo, la calibración de una campana gasométrica de $0,2 \text{ m}^3$ (200 L) puede tomar entre 2 días y 5 días con dos trabajadores. En este tiempo también influye el tamaño de las dosis, que es igual al volumen del recipiente patrón, ya que otro problema es el volumen de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

La norma china JJG 165-2005 (*State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2005*) establece que la razón entre el volumen del recipiente patrón y la sección verificada de la campana es generalmente 1:5. Al tener la LJQ-20 un volumen de colección de 10 L y la LJQ-100 de

aproximadamente 70 L calculado en base a las mediciones realizadas, los recipientes patrones requeridos para realizar la calibración tendrían que tener una capacidad de 2 L y 14 L. Por lo argumentado tendrían que ser dos recipientes patrones para este método y uno de ellos de dimensiones pequeñas (2 L). Respecto a ambos, no se encuentra en la bibliografía consultada referencia a recipientes de esta capacidad para realizar este método de calibración, en especial el de 2 L.

Como se observa en la Tabla 1, los patrones que se utilizan tienen capacidades entre 20 L y 50 L. Los dos recipientes patrones necesarios habría que adquirirlos en el extranjero y no serían los recipientes patrones de Clase I usuales de los servicios volumétricos de metrología, sino otros especialmente diseñados para la calibración gasométrica de campanas de gas por el método de desplazamiento. Entre los fabricantes reconocidos de campanas gasométricas no ha sido posible encontrar una oferta de los dos recipientes patrones necesarios.

El método de calibración utilizando un contador de gas de referencia de desplazamiento rotatorio o de manera más general donde se utilizan contadores de gas como patrón es uno de los más recientes. De llevarse a cabo este método, se recomienda utilizar un contador de gas patrón con una incertidumbre de calibración expandida como máximo 0,25 % (error máximo permitido menor que 0,15 %) para tener seguridad de que la campana quede calibrada con una incertidumbre de calibración $< 0,5$ %.

Además, el contador de gas tendría que ser calibrado en otro país cada 2 años si sólo se utiliza en la calibración de la campana gasométrica, lo que significa que no se lograría la trazabilidad metrológica en el país. El metro contador

patrón adquirido tendría que ser compatible por su capacidad con las instalaciones de tipo campana que se encuentran en Cuba y en la primera calibración deberían participar técnicos extranjeros con experiencia en el método, donde se debería esclarecer entre otros detalles cómo lograr a partir del volumen específico desplazado k_v determinar el factor de calibración K que interviene en el funcionamiento de la campana.

El último método a tomar en consideración sería utilizando una tobera de flujo crítico como patrón. Este método ofrece bajas incertidumbres de medición combinadas con altos niveles de repetibilidad y confianza. Esta característica favorece el uso de las toberas de flujo crítico como patrones de transferencia durante la calibración de campanas gasométricas. Como desventaja se identificó que, aunque la Empresa Yuri Gagarin puede dar trazabilidad al contador de tiempo empleado en esta calibración y los medidores de presión y temperatura necesarios se pueden calibrar en Cuba, de adquirirse la tobera sónica apropiada, no existe en el país donde calibrarla.

El análisis realizado conlleva a la reflexión consciente de cuánto costaría a Cuba adquirir los instrumentos de medición que requieren cada uno de los métodos de calibración o importar el servicio de calibración de las campanas gasométricas. A modo de ejemplo, en el Anexo 11 se muestra las tarifas que establece el Ministerio de Justicia de Canadá para la certificación de campanas gasométricas en ese país. Este servicio brindado por *Measurement Canada* (agencia gubernamental) y laboratorios aprobados costaría (luego de las conversiones adecuadas a litros y USD) 119 USD por certificar una campana de 20 L y 159 USD por una de 100 L, ambas por el método de encintado. Brindar este servicio en Cuba a un precio igual o menor significaría un ahorro

económico pues evitaría importar el servicio periódicamente y aportaría a la soberanía tecnológica del país.

Como resultado del estudio de todos los métodos presentados y del diagnóstico realizado se considera el método de encintado como el más conveniente para implementar en Cuba. Algunas de sus ventajas que evidencian el porqué de esta selección son:

1. Las desviaciones de presión, humedad relativa, y temperatura no afectan la calidad de las mediciones (siempre y cuando se mantengan en los límites previstos).
2. El uso de una cinta de diámetro como instrumento patrón, hace que no se requiera de un desarme completo de la campana.
3. Todos los patrones previstos tienen garantizada su trazabilidad metrológica en el país y una parte ellos se encuentran en el INIMET.
 - Se emplearía un calibrador vernier de (0 a 200) mm, Resolución= 0,05 mm, para medir las dimensiones de la escala. La norma china JJG 165-2005 no especifica el instrumento a utilizar para estas mediciones y el calibrador vernier es cómodo para mediciones de espesor y ancho de la placa de escala.
 - Una regla metálica de (0 a 300) mm, Resolución= 1 mm para medir la distancia entre la campana y el tanque. La distancia entre la campana y el tanque se medirá con una regla metálica para hallar de acuerdo al manual *Examination of Vapor-Measuring Devices for Liquefied Petroleum Gas* (Hasko, 1975), el diámetro del tanque que contiene el líquido sellante. Esta distancia es inferior a 3 cm en ambas campanas, la diferencia de altura de líquido menor de 1 cm en la campana

gasométrica modelo LJQ-100 por lo que el intervalo de medición de la regla metálica es suficiente.

- La regla metálica se utilizaría también para determinar la variación del nivel de aceite en la campana gasométrica modelo LJQ-100, pues esta posee un visor diseñado para ello.
 - La campana gasométrica modelo LJQ-20 no presenta visor, por lo que se utilizaría un micrómetro de profundidad de (0 a 300) mm, Resolución= 0,01 mm para su medición. La norma china JJG 165-2005 permite el uso de este instrumento. Su intervalo de medición permite que sujetándolo firmemente en la superficie plana en la parte superior del tanque pueda llegar hasta el líquido de sellaje. Si se desea puede emplearse también para medir la diferencia de altura de líquido en la campana gasométrica modelo LJQ-100 en lugar de la regla metálica.
 - 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. La norma china JJG 165-2005 establece el uso de este instrumento.
4. La incertidumbre de calibración sería menor de 0,5 % en la campana de 100 L y menor de 1 % en la de 20 L, lo que es un valor aceptable para el servicio que realizan las campanas gasométricas de este modelo en Cuba.

No obstante las ventajas señaladas, la implementación del método tiene algunas desventajas que debes ser superadas. Estas son:

1. Pueden ocurrir errores en las mediciones de encintado debido a una desalineación de la cinta en los perímetros de la campana. Sin embargo, teniendo cuidado, el operador puede evitarlos o hacerlos insignificantes.

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. En la actualidad, con los métodos modernos de fabricación, la producción de una campana con una sección transversal verdaderamente circular no resulta difícil.
3. No incluye automáticamente los efectos de abolladuras o deformaciones significativas en la campana. Como se explica en el diagnóstico las campanas en cuestión no presentan abolladuras o deformaciones significativas. De aparecer alguna en el futuro habría que hacer las correspondientes correcciones a la forma de la campana o declarar que esta abolladura eleva la incertidumbre, y por tanto, la campana no puede ser utilizada para la calibración de los contadores de gas.
4. La cantidad de datos registrados es mayor que en otros métodos. No obstante, es posible la elaboración de un registro de medición donde los datos sean recogidos de manera ordenada.

Como conclusiones de este capítulo se señala que el método de encintado es el de elección para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 y de esta forma garantizar la trazabilidad de las verificaciones de los contadores de gas en el país.

Capítulo 3 Método de encintado para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 en Cuba

En este capítulo se realiza el análisis de la incertidumbre de medición en la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 por el método de encintado y se establece la instrucción de calibración requerida para la implementación del método en el país.

3.1 Análisis de la incertidumbre de medición del método de encintado.

Las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 se utilizan para llevar a cabo la verificación inicial de contadores de gas de diafragma de clase 1,5 cuyos errores a verificar deben ser inferiores a $\pm 1,5\%$ a $Q_{m\acute{a}x}$ y $0,2Q_{max}$ y a $\pm 3\%$ a Q_{min} . Donde la verificación a $Q_{m\acute{a}x}$ la realiza la campana de 100 L y a Q_{min} la campana de 20 L. Esto significa, siguiendo el criterio de la norma OIML R 137-1&2:2012 (International Organization of Legal Metrology, 2012), que la incertidumbre expandida de la verificación debe ser menor que $\frac{1}{3}EMP$ (EMP: Error máximo permitido). Dicho de otro modo, menor que 0,5 % para la campana de 100 L y menor de 1 % para la campana de 20 L.

Para asegurar una incertidumbre expandida de verificación que cumpla con el valor requerido y la incertidumbre expandida de calibración de la campana gasométrica, una de las componentes de la incertidumbre expandida de la verificación, debe ser menor de 0,5 % en un caso y menor de 1% en otro.

En una estimación preliminar realizada a la calibración por método de encintado, la incertidumbre expandida alcanzó un valor de 0,3 % para la

campana de 100 L y de 0,6 % para la de 20 L, los que se consideran valores adecuados.

Un diagrama causa-efecto con las diferentes variables que influyen en la estimación de la incertidumbre del volumen de la campana gasométrica puede observarse en la Figura 5.



Figura 5. Diagrama de causa y efecto de las variables que influyen en la estimación de la incertidumbre del volumen de la campana gasométrica.

En el 2014 las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 fueron verificadas en China por la norma de este país *JJG 165-2005 Verification Regulations of Standard Bell Provers of Gas Flow* y ambas obtuvieron una incertidumbre expandida de 0,4 %. Las incertidumbres estimadas de aplicar en

Cuba el método propuesto se acercan a este valor. Al no tener todos los valores de las mediciones realizadas por los especialistas chinos ni la lista completa de los instrumentos de medición que emplearon junto con sus características metroológicas no es posible establecer claramente por qué los valores de la incertidumbre preliminar estimada no son exactamente iguales a los obtenidos en el Laboratorio chino.

3.2 Instrucción de calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100

El método de encintado se aplica en esta investigación como fundamento para la instrucción de calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

El resultado que se presenta se acoge a la siguiente definición:

“Instrucción de calibración: Documento interno asociado a un laboratorio que recoge los métodos y técnicas para calibrar instrumentos de medición específicos, en el que se describe de manera ordenada y detallada cómo se realiza esta actividad” (Valdés Pereira, 2014, pág. 1).

Las partes que incluye este documento son:

1. Objetivo y alcance

El presente documento establece el método y los medios para la calibración de las campanas gasométricas de volumen nominal 20 L y 100 L, por el método de encintado; así como la estimación de la incertidumbre de los resultados, en base a la NC 1066:2015 “Guía para la expresión de la incertidumbre”.

2. Términos y definiciones

Campana Gasométrica: Dispositivo de medición volumétrico utilizado para gases y 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.

Encintado: Método de calibrar una campana gasométrica determinando la relación entre el volumen desplazado y el movimiento lineal de la campana por medio de la medición de la longitud de la escala, la circunferencia de la campana y el desplazamiento del líquido de sellaje.

3. Responsabilidades

Subdirector de Metrología: Presenta los documentos elaborados y revisados al Jefe del Departamento de Sistemas para su registro. Designa a los integrantes del Grupo de Expertos para el análisis de los proyectos de instrucciones de calibración.

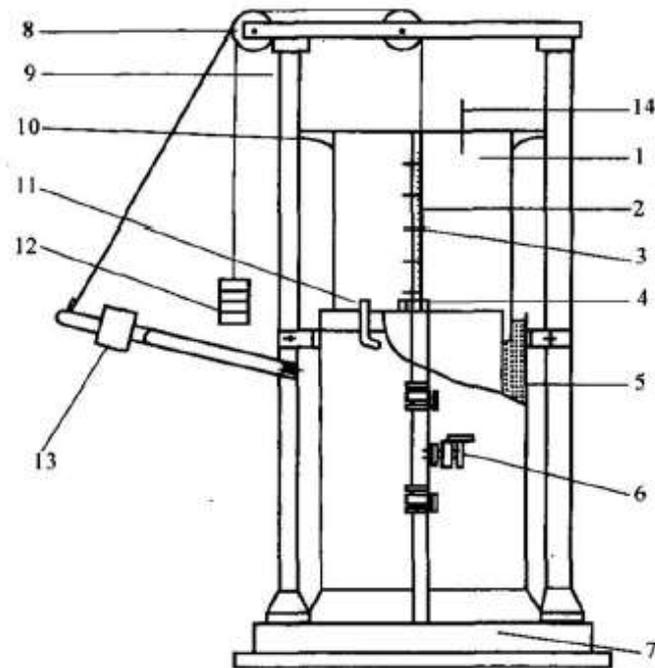
Jefe de laboratorio: Revisa la instrucción de calibración, y cumple lo establecido en el PG 01 con respecto a la elaboración, revisión, aprobación, control y conservación de los documentos del SGC. Supervisa la ejecución del servicio de calibración de acuerdo con lo establecido en la presente instrucción.

Responsable de la documentación: Archiva este documento y vela por su adecuada conservación. Garantiza que los especialistas autorizados para la ejecución del servicio dispongan de un ejemplar actualizado del mismo en su puesto de trabajo.

Especialistas y técnicos: Ejecutan el servicio de calibración de la campana gasométrica según lo establecido en la presente instrucción de calibración.

4. Generalidades

En la Figura 6 se muestra una campana gasométrica común con sus aditamentos



Leyenda: 1-Campana, 2- Placa de escala, 3- Deflector, 4-Transmisor de señal fotoeléctrica, 5- Canal artificial, 6- Válvula de ajuste, 7- Base, 8- Polea, 9- Pilar guía, 10- Rueda exterior guía, 11- Indicador del nivel de aceite, 12- Contrapeso, 13-Dispositivo compensador de la presión y 14-Termómetro.

Figura 6. Dispositivo Campana Gasométrica

5. Instrumentos de medición patrones y auxiliares empleados durante la calibración

5.1. Instrumentos de medición para la calibración de la campana gasométrica

- Regla Metálica de (0 a 300) mm. Resolución: 1 mm. Error máximo permitido (EMP): $\pm 0,2$ mm.
- Pie de rey universal de (0 a 200) mm. Resolución: 0,05 mm. EMP: $\pm 0,1$ mm.

- Cinta de diámetro: \varnothing de (200 a 330) mm. Resolución: 0,05 mm, EMP: $\pm 0,1$ mm.
- Cinta de diámetro: \varnothing de (300 a 620) mm. Resolución: 0,05 mm, EMP: $\pm 0,1$ mm.
- Micrómetro de profundidad de (0 a 300) mm. Resolución: 0,01 mm. EMP: $\pm 0,02$ mm.
- Placa de escala. Resolución: 1 mm. EMP: $\pm 0,2$ mm.
- Medidor de temperatura dentro de la campana. Resolución $\leq 0,2$ °C
- Medidor de presión dentro de la campana. Resolución ≤ 10 Pa.
- *Encoder* rotatorio, cronómetro, mangueras y conectores.

5.2. Instrumentos de medición para controlar las condiciones ambientales

Termo-higrómetro ambiental. Resolución $\leq 0,2$ °C (escala de temperatura),

Resolución ≤ 1 % (escala de humedad relativa del aire).

Medidor de presión atmosférica: Exactitud $< 0,1$ %.

6 Preparación para la calibración

6.1 Condiciones ambientales

La temperatura del local de calibración debe ser de (20 ± 5) °C, la humedad relativa de (30 a 80) %. Presión atmosférica de (86 a 106) kPa. La variación máxima permisible de temperatura durante el descenso de la campana será de 0,5 °C y la variación máxima permisible de la presión atmosférica en el tiempo de la calibración de 80 Pa.

7 Ejecución de la calibración

7.1 Examen exterior

- Se comprueba visualmente que la campana, el canal artificial y el pilar guía estén en posición vertical respecto a la superficie del fondo.

- La placa de escala deberá estar instalada paralela a la línea central de la campana. La escala deberá ser uniforme y clara.
- El material de la campana deberá ser anticorrosivo y metálico.
- La superficie de la campana no deberá tener arañazos ni abolladuras. Las soldaduras deberán ser pulidas y uniformes.
- Las válvulas deberán ser flexibles para girar con un buen sellado y sin filtraciones.
- Todas las tuberías del dispositivo deberán permanecer sin fugas.
- Se verificará que se utilice aceite como líquido de sellado.
- La placa de identificación deberá estar fijada en una posición del dispositivo e indicar el producto, modelo, nombre del fabricante, número de serie, fecha de fabricación, clase de exactitud.

7.2 Comprobación preliminar

- Prueba de hermeticidad

Con el objetivo de comprobar la hermeticidad, después de elevarse la campana a la posición superior se cerrará la válvula por 10 minutos. Una vez en la posición superior se anota esta, así como la temperatura del gas y presión dentro de la campana. Luego de una hora se observa su posición, la temperatura del gas y la presión dentro de la campana. Si el cambio de posición no es mayor que tres divisiones de la escala, influenciado por la variación de la temperatura y la presión, entonces la campana se considera como sellada. De no ser así, debe existir fuga de gas, se debe contactar con el servicio de mantenimiento y posponer la calibración.

- Prueba de control de la presión dentro de la campana

El incremento de la presión dentro de la campana en movimiento debe ser controlado de modo que la variación de la presión del aire dentro de la campana sea ≤ 50 Pa. Se elevará la campana hasta arriba y cuando el dispositivo este estable (tiempo de estabilidad mínimo 2 minutos) se abrirá la válvula y se hará que baje la campana a flujo máximo. Simultáneamente se observa el valor de la presión dentro de la campana y se tomará la variación máxima de presión mientras baja la campana. Se realizará la prueba dos veces a flujo máximo y dos veces a flujo mínimo. Se tomará el máximo incremento de presión $\Delta P_{\text{máx}}$ de las cuatro pruebas como la variación de la presión del aire dentro de la campana.

- Prueba de control de la variación de la temperatura

La temperatura del dispositivo deberá ser controlada de modo que la variación de la temperatura del aire dentro de la campana sea $\leq 0,5$ °C durante el descenso de la campana. Se hará descender la campana en tres ocasiones a flujo máximo. Se tomará la máxima variación de temperatura ΔT de las tres pruebas como la variación de la temperatura del aire dentro de la campana.

7.3 Determinación de los parámetros metrológicos

7.3.1. Determinación del Volumen Patrón de la Campana Gasométrica

Las posiciones principales en que se encontrará la campana gasométrica se observan en la Figura 7.

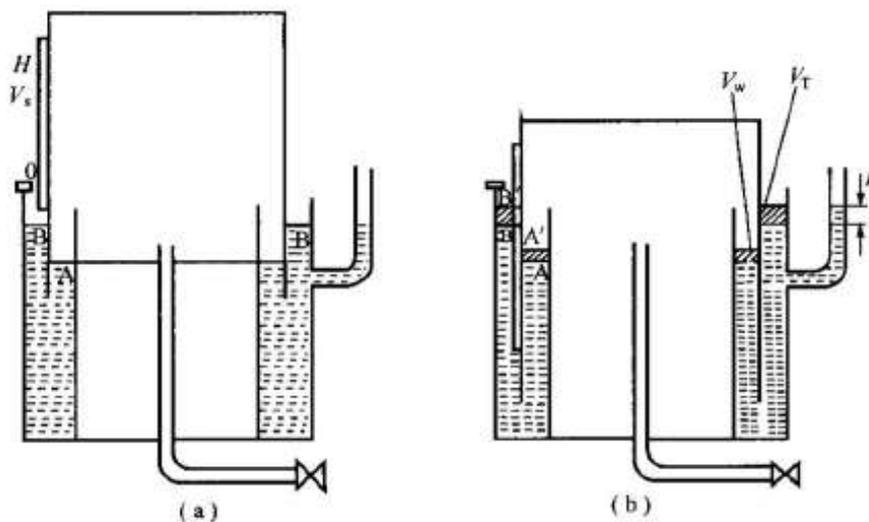


Figura 7. Posiciones de la Campana Gasométrica

- a) Ilustra la posición cuando el punto inferior de la campana se alinea con el transmisor de señal fotoeléctrico.
- b) Ilustra la posición cuando el punto superior de la campana se alinea con el transmisor de señal fotoeléctrico.

Dónde A es nivel de líquido dentro de la campana, B es el nivel de líquido exterior, H es la altura, V_s es el volumen de la escala, A' es el nivel del líquido dentro de la campana luego de su descenso, B' es el nivel del líquido fuera de la campana luego de su descenso, V_w es el volumen del líquido que se eleva entre el tanque y la superficie interior de la campana, V_T es el volumen del líquido que se eleva entre la superficie exterior y el tanque y h es la diferencia de altura en el nivel de líquido luego del descenso de la campana.

El volumen de la campana gasométrica se determinará de la manera siguiente:

- 1) Se observarán los puntos en la placa de escala donde la campana inicia el descenso y donde luego se detiene para ir de la posición a) a la b) (Figura 7). Estos se anotarán como punto inferior de la escala y punto

superior y se medirán 6 veces. Se anotarán los pulsos al pasar de la posición a) a la b) las seis ocasiones.

- 2) Se tomará la altura de la campana gasométrica H , en base a la distancia entre los puntos superior e inferior de la escala por medio de la escala milimetrada. La altura promedio será:

$$\bar{H} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^9 H_i \quad [mm]$$

H_i – es el valor i -ésimo de la altura medida.

- 3) Se colocará la campana en la posición a) colocándose en el punto inferior promedio de la escala. Se hará una marca en la campana al nivel del aceite en cuatro lugares distribuidos de manera uniforme en la periferia de esta.
- 4) Se realizará este mismo procedimiento en la posición b) colocándose en el punto superior promedio de la escala, y realizándose las marcas en cuatro lugares distribuidos de manera uniforme en la periferia de esta.
- 5) Se marcará el punto medio entre la marca superior e inferior de la campana y se considerará como la sección intermedia. Se marcarán cuatro lugares de manera uniforme en la sección intermedia.
- 6) Se medirá el diámetro de la sección superior, intermedia y baja separadamente 3 veces en cada sección (9 veces en total) con la cinta de diámetro. Durante cada medición el borde inferior (o superior) de la cinta de diámetro o de la cinta de medición deberá estar alineado con las 4 marcas de la sección medida.
- 7) El diámetro promedio \bar{d} será:

$$\bar{d} = \frac{1}{9} \sum_{1}^{9} d_i \quad [mm]$$

d_i – es el valor i -ésimo del diámetro

8) Se medirá el volumen de la sección V_T del paso del nivel del líquido B al nivel B' en el canal exterior a la campana (Figura 7). Para esto se ajustará la campana a la posición a) teniendo en cuenta el promedio del punto inferior y se tomará la altura del nivel de líquido B en el medidor del nivel de líquido. Luego se colocará en la posición b) tomando en cuenta el promedio del punto superior y se tomará la altura del líquido B' en el medidor del nivel de líquido. Se hallará la diferencia de alturas h del nivel B y B' . Se realizará esta medición tres veces auxiliándose de la regla metálica, y se tomará el valor promedio \bar{h} . Puede usarse también el micrómetro de profundidad que se apoyará en el borde del tanque exterior de la campana.

9) Se tomará la distancia promedio \bar{L} entre la superficie exterior de la campana y la superficie interior del tanque de acumulación exterior como el valor promedio de cuatro mediciones por la regla metálica en la periferia de la campana .

10) El diámetro del tanque D provendrá de la ecuación:

$$D = \bar{d} + 2\bar{L} \quad [mm]$$

\bar{L} – es la distancia promedio entre la superficie exterior de la campana y la superficie interior del tanque de acumulación exterior.

11) El volumen de la sección V_T será:

$$V_T = \frac{\pi}{4}(D^2 - \bar{d}^2) \times \bar{h} \quad [dm^3]$$

12) Por último se medirá el espesor e y el ancho B de la placa de escala (se medirá en la parte superior, intermedia y baja separadamente y se tomará el promedio del valor de las tres mediciones), se utilizará para esto el pie de rey universal.

13) El volumen de la placa de escala V_S será:

$$V_S = \bar{H}eB \quad [dm^3]$$

14) Si $(20 \text{ °C} - \Theta) < 5 \text{ °C}$ El volumen patrón de la campana gasométrica se calculará como:

$$V = \frac{\pi}{4}(\bar{d}^2) \times \bar{H} + V_S - V_T \quad [dm^3]$$

y la constante de calibración K .

$$K = \frac{C}{V_{20}}$$

Donde C [pulsos] es el número de pulsos generados y V_{20} [L] el volumen de la campana calculado por la Ec. 24.

7.4 Evaluación de la incertidumbre de las mediciones

El modelo matemático en este caso sería:

$$V = \frac{\pi}{4}(\bar{d}^2)\bar{H} + \bar{H}eB - \frac{\pi}{4}[D^2 - (\bar{d}^2)]\bar{h} + \delta V \quad [dm^3]$$

Donde V es el volumen de la campana gasométrica, en dm^3 ; \bar{d} es el diámetro promedio, en dm ; \bar{H} es su altura promedio, 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 del tanque, 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 la variación en el volumen del gas debido a la adherencia de la película de aceite a las paredes de la campana.

Para la determinación del volumen de la campana gasométrica las componentes de incertidumbre que se tendrán en cuenta serán:

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

Incertidumbre combinada:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_c^2 = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial d} \right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)^2 u_H^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial e} \right)^2 u_e^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial B} \right)^2 u_B^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} \right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \right)^2 u_h^2 + u_{\delta V}^2 \right] \\ u_c^2 = \left[\left(\frac{\pi}{2} \overline{Hd} + \frac{\pi}{2} \overline{hd} \right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\pi}{4} \overline{d}^2 + eB \right)^2 u_H^2 + (\overline{HB})^2 u_e^2 + (\overline{He})^2 u_B^2 \right. \\ \left. + \left(-\frac{\pi \overline{hD}}{2} \right)^2 u_D^2 + \left(-\frac{\pi}{4} [D^2 - d^2] \right)^2 u_h^2 + u_{\delta V}^2 \right] \end{array} \right.$$

El presupuesto de incertidumbre para la determinación del volumen de la campana gasométrica se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Presupuesto de incertidumbre para el volumen de la campana gasométrica de 100 dm³

Comp. de incert. típica	Fuente de incertidumbre	Ecuación	Valor de la incert. típica	Coef. de sensibilidad
$u_{\bar{d}}$ (dm)	Diámetro promedio	$\left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{(n)(n-1)}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\bar{d} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{d} \cdot \alpha \cdot 0,1 \cdot \Delta T_{ref}}{\sqrt{2}} \right)^2$	0,002	34,7
$u_{\bar{H}}$ (dm)	Altura promedio	$\left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{(n)(n-1)}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\bar{H} \cdot \alpha \cdot 0,1 \cdot \Delta T_{ref}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{H} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{2}} \right)^2$	0,004	14,4
u_e (dm)	Espesor de la placa de escala	$\left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{(n)(n-1)}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,0006	1,5

Comp. de incert. típica	Fuente de incertidumbre	Ecuación	Valor de la incert. típica	Coef. de sensibilidad
u_B (dm)	Ancho B de la placa de la escala	$\left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}{(n)(n-1)}} \right]^2 + \left(\frac{\bar{B} \cdot \alpha \cdot 0,1 \cdot \Delta T_{ref}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{B} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,0006	0,05
u_D (dm)	Diámetro del tanque D	$\left\{ \left(\frac{u_{\bar{d}}}{\bar{d}} \right)^2 + 4 \left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{(n)(n-1)}} \right]^2 + \left(\frac{\bar{L} \cdot \alpha \cdot 0,1 \cdot \Delta T_{ref}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{L} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$	0,04	-0,4
$u_{\bar{h}}$ (dm)	Diferencia de altura del nivel de líquido	$\left[\left(\frac{R}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{EMP}{\sqrt{3}} \right)^2 + t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{(n)(n-1)}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,008	-2,9
$u_{\delta V}$ (dm ³)	Adherencia de la capa de aceite	$\frac{\delta V}{\sqrt{3}}$	0,006	1

Comp. de incert. típica	Fuente de incertidumbre	Ecuación	Valor de la incert. típica	Coef. de sensibilidad
u_c	Incert. comb.	$u_c = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial d} \right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)^2 u_H^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial e} \right)^2 u_e^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial B} \right)^2 u_B^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} \right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \right)^2 u_h^2 + u_{\Delta V}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ $u_c(V) = 0,10 \text{ dm}^3$		
U	Incert. exp.	$U(V) = k \cdot u_c = 0,2 \text{ dm}^3 \quad U_{rel}(V) = 0,3 \%$		

Siendo n el número de mediciones y t_s el factor de seguridad (calculado sobre la base del factor t de Student). Para la diferencia entre la temperatura ambiente y la de referencia tomamos $\Delta T_{ref} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y para la diferencia entre temperatura entre los instrumentos de medición y las superficies de medición $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$. La diferencia entre los coeficientes de dilatación es menor del 10%. El coeficiente de dilatación será el del acero $\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

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 %.

8 Registro y presentación de los resultados

En el Anexo 12 se muestra el modelo de Registro de calibración.

Esta instrucción, luego de realizarse el resto del estudio experimental debe ser presentada por el jefe de laboratorio de Volumen del INIMET al responsable del Grupo de Expertos (GE) para su análisis. El responsable del GE llenará el MPG 01-02 "Acta de aprobación de la instrucción de calibración o de ensayo", velará por el cumplimiento de lo establecido en el procedimiento específico LA 01 "Capacidades de medición de los laboratorios", el LA 02 "Validación de los métodos", el LA 03 "Evaluación de la incertidumbre" y el procedimiento PG-01 "Gestión de la documentación" en lo referente al formato y contenido del documento. Después de aprobada la instrucción, el Subdirector de Metrología entregará al Jefe de Departamento de Sistemas el original en copia dura para su identificación y registro y esta podrá ser aplicada. El método de expertos adoptado por el sistema de gestión de la calidad del INIMET, resulta una aproximación del método utilizado internacionalmente para la aprobación de las normas internacionales.

La valoración de la factibilidad de aplicación del método de encintado se evidencia a través de los resultados del diagnóstico, el análisis de las diferentes variantes disponibles según el estado del arte y la selección de uno de los métodos normalizados. Igualmente, demostrando teóricamente que es posible obtener resultados con la exactitud requerida para calibrar las campanas gasométricas y garantizar la trazabilidad metrológica de los contadores de gas. El método de encintado es tratado en documentos científicos y se utiliza en la norma china *JJG 165-2005 Verification Regulations of Standard Bell Provers of Gas Flow* (State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2005). Basada en este método se elaboró la propuesta de instrucción de calibración.

Antes de implementar este método para calibrar las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 se debe desmontar la escala milimetrada que indica la altura de la campana gasométrica para su calibración en un laboratorio metrológico, aunque sea solamente una vez durante toda su vida útil. Los volúmenes determinados se reportarán teniendo en cuenta la altura que aparece en la escala milimetrada.

Se recomienda, además, 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.

Conclusiones

- 1 El estudio realizado permitió determinar que el método de encintado es idóneo para la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 en las condiciones científicas, tecnológicas y económicas de este momento en Cuba.
- 2 El estudio del estado del arte permitió identificar los métodos tradicionales y los desarrollos recientes de calibración de campanas gasométricas y su funcionamiento.
- 3 El estado actual que presenta la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100, que se revela en su caracterización y en los resultados del diagnóstico, evidencia la necesidad de mantener las condiciones ambientales del laboratorio y de encontrar un método para su calibración, ya que en estos momentos no presentan certificado de calibración y, consecuentemente, no se utilizan.
- 4 Quedó demostrado que, para la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 es apropiado la utilización del método de encintado que, sin ser altamente demandante de recursos, logra resultados que se enmarcan en los niveles de incertidumbre internacionalmente aceptados para esta nomenclatura.

Recomendaciones

1. Revisar la instrucción de calibración por el grupo de expertos y continuar el trabajo experimental para validarla, constatando así su efectividad y eficacia en la calibración de las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100.
2. Divulgar y socializar el tratamiento que se le da a la calibración de campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 en esta investigación en actividades científicas y en publicaciones especializadas para que sirva de base a quienes trabajen este tema y que lo propuesto pueda ser aplicado en otros laboratorios donde existan este modelo de campanas.
3. Capacitar a los especialistas y técnicos del Laboratorio Volumen del INIMET para la aplicación de la instrucción de calibración que se propone.
4. Continuar desarrollando el trabajo investigativo en función de la calibración de campanas gasométricas en años venideros implementando otros métodos de calibración existentes cuando sea necesario, entre otras razones, porque no sólo podría sustituir importaciones, sino que podría convertirse en un servicio exportable.

Referencias bibliográficas

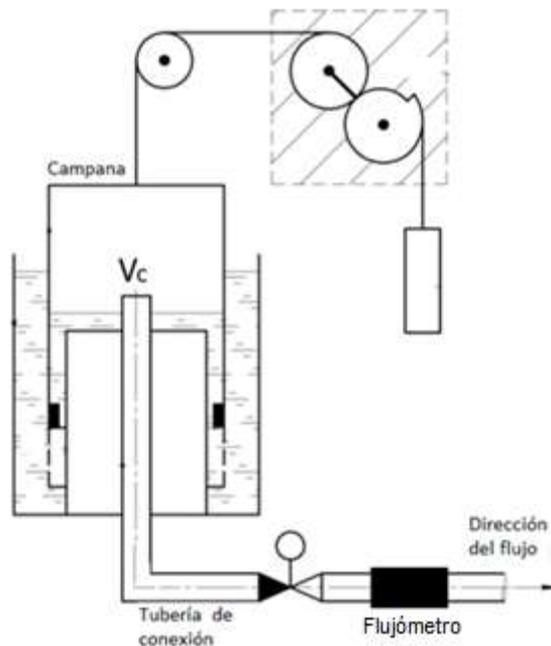
- Benkova, M., Makovnik, S., Mikulecky, I., & Zamecnik, V. (2011). Bell Prover - Calibration and Monitoring of Time Stability. *Journal of Metrology Society of India, Vol. 26(3)*, 165-171.
- Collet, C. T. (1972). Calibration of Bell Provers by Dimensional Analysis and by Cubic Foot Standards, Comparison of "Strapping" and "Bottling". *Precision Measurement and Calibration: Mechanics*.
- Cui Lishui, L. (2010). A kind of New Calibration Method for the Volume of Bell Prover. *15th Flow Measurement Conference (FLOMEKO)* (págs. 1-5). Taiwan, China: FLOMEKO 2010.
- Fillmer, W., & Fillmer, C. (1990). Dynamics of the Bell Prover, II,. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 95(1)*.
- Gervacio, J. C. (2010). Tobera de flujo crítico como patrón de calibración de medidores industriales tipo campana. *Simposio de Metrología*. Querétaro, México .
- Government of Canada. (Septiembre de 2021). *Canada.ca*. Recuperado en Septiembre de 2021, de Canada.ca: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/eng/lm00568.html>
- Hangzhou TNMA Measure Technology Co. . (Octubre de 2019). *Hangzhou TNMA Measure Technology Co. .* Recuperado en Octubre de 2019, de LJQ series bell-type gas flow standard device: <https://hztnma.com>
- Hasko, S. (1975). *Examination of Vapor-Measuring Devices for Liquefied Petroleum Gas*. Washington, D.C., U.S.: U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE.

- Hernández Apaceiro, M., & Espinosa Delgado, G. (2006). Aseguramiento metrológico en la magnitud de volumen y flujo a la instalación de verificación de contadores domésticos de gas. *Boletín Científico Técnico INIMET*, 23-29.
- International Organization for Standardization. (1991). *ISO 4006:1991 Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and Symbols*. Switzerland: ISO.
- International Organization of Legal Metrology. (2012). *OIML R 137-1&2:2012. Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests*. Paris: OIML.
- Maldonado, J. M., & Gervacio, J. C. (2004). Calibración del patrón nacional de flujo de gas por el método de desplazamiento. *Simposio de Metrología*, (págs. 1-6). Querétaro, México.
- Mazur, V., Rak, A., & Shchupak, I. (2015). Discrete dynamic bell type instrument of combined work principle for the calibration of gas meters. *17th International Congress of Metrology*. Paris.
- Mercado, J. J., & Maldonado, J. M. (2020). *Rediseño del sistema de medición de desplazamiento vertical del patrón nacional para medición de flujo de gas*. <http://www.cenam.mx>
- Mickan, B., & Kramer, R. (2009). Evaluation of two new volumetric primary standards for gas volume established by PTB. *7th ISFFM*. Anchorage, Alaska.
- Minister of Justice, Canada. (2018). *Electricity and Gas Inspection Regulations*. <https://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/SOR-86-131.pdf>

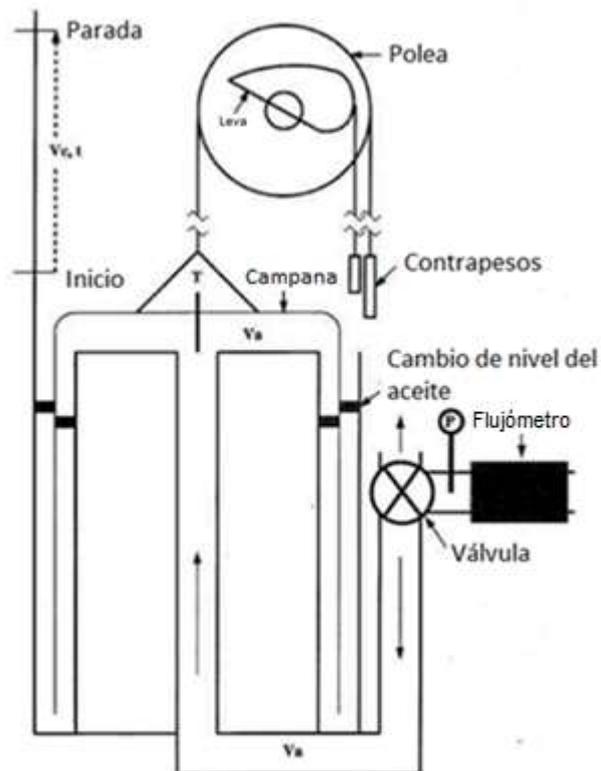
- Oficina Nacional de Estadística e Información. (2018). *Anuario Nacional de Estadísticas*. La Habana. <http://www.onei.gob.cu/node/13804>
- Oficina Nacional de Normalización. (2012). *NC OIML V2: 2012 Vocabulario internacional de metrología- Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*. La Habana: NC.
- Oficina Nacional de Normalización. (2015). *NC 1066 Guía para la expresión de la incertidumbre*. La Habana, Cuba: NC.
- Oficina Nacional de Normalización. (2020). *Disposición General 01 (DG-01) Instrumentos de medición sujetos a Control Metrológico Legal según los campos de aplicación donde serán utilizados*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización, Servicio Nacional de Metrología (SENAMET).
- Oficina Nacional de Normalización. (2020). *NC 1006:2020. Metrocontadores de gas de diafragma – Métodos y equipos de verificación*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización (NC).
- Pavlovic, B., Kozmar, H., & Šunić, M. (2008). Advances in Gas Flow Measurement using Weighing Method. *Strojarstvo*, 50 (5), 295-304.
- Romero, R. A. (2002). Trazabilidad e incertidumbre en las mediciones de flujo de hidrocarburos. *1er Seminario Latinoamericano de Medición de flujo de Hidrocarburos*, (págs. 1-18). Querétaro, México.
- Schwenk. (Agosto de 2021). *Schwenk*. Recuperado el Agosto de 2021, de <http://www.schwenk-lmt.de/kn32szkw.html?locale=en>
- State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. (2005). *JJG 165-2005 Verification Regulations of Standard Bell Provers of Gas Flow*.

- Szewczyk, R., Krejsa, J., Nowicki, N., & Ostaszewska, A. (2020). *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*. Switzerland: Springer Nature.
- Tonkonogij, J., Stankevičius, A., Bertašienė, A., & Tonkonogovas, A. (2015). The new method for calibration and testing of the bell type prover. 17 *International Congress of Metrology*. Paris, France: EDP Sciences, .
- Valdés Pereira, N. (2014). *Gestión de la documentación. Procedimiento general. PG 01*. La Habana.
- Wright, J. D. (2001). Laboratory Primary Standards. *Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control*, 731-760.
- Wright, J. D. (2003). What is the best transfer standard for gas flow? *Proceedings of FLOMEKO*. Groningen, Netherlands.
- Wright, J. D., & Mattingly, G. (1998). NIST Calibration Service for Gas Flow Meters Piston Prover and Bell Prover Gas Flow Facilities. *NIST Special Publication*, 250-49.
- Кузьменко, Ю., & Самойленко, А. (2015). Градуировка колокола установок для поверки счетчиков текучей среды. *Український метрологічний журнал*(1), 49-54.

Anexo 1 Funcionamiento de la campana gasométrica



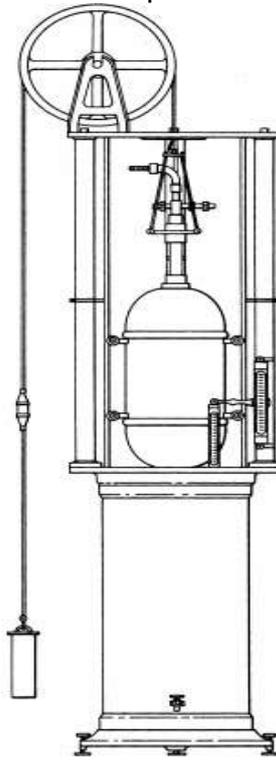
Sistema típico para medir flujo (Mazur, Rak, & Shchupak, 2015, pág. 2)



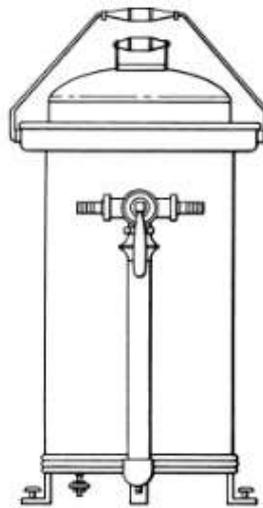
La campana gasométrica muestra el volumen de colección (V_c), el volumen de conexión (V_a), la ubicación de los sensores de temperatura (T) y de presión (P), y posición de inicio y parada utilizadas para medir el tiempo de colección (Δt). (Wright & Mattingly, 1998, pág. 31)

Anexo 2 Calibración por botella de pie cúbico

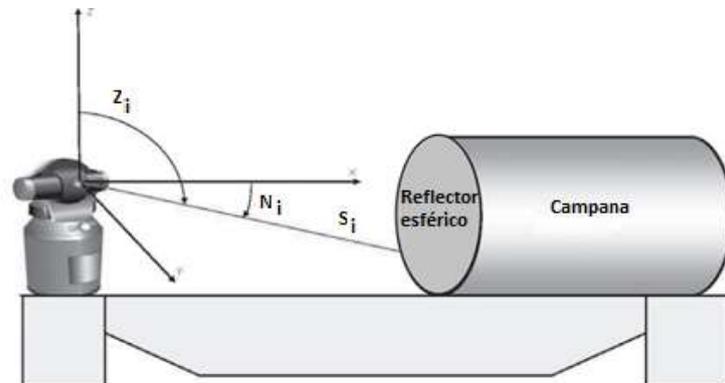
Vista exterior una botella de pie cúbico portable (Hasko, 1975, pág. 5)



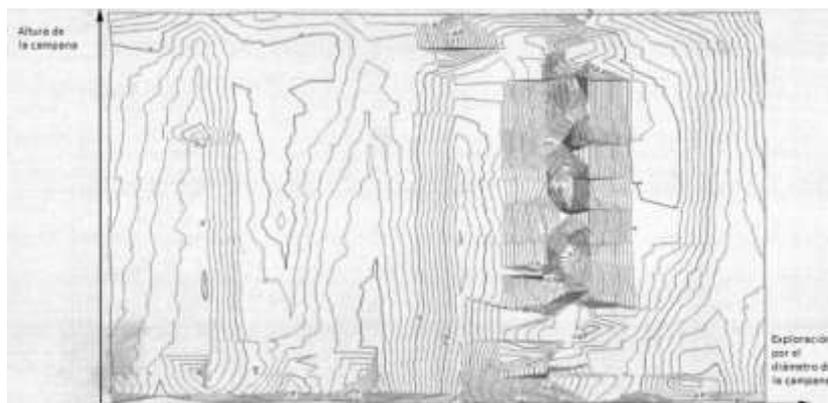
Vista exterior de un patrón de pie cúbico (Hasko, 1975, pág. 6)



Anexo 3 Rastreador láser



Esquema general de medición de las coordenadas espaciales de los puntos de referencia en la superficie interna de la campana gasométrica (Кузьменко & Самойленко, 2015)



Exploración de la superficie cilíndrica de la campana gasométrica en un plano con isolíneas, que reflejan el relieve de su superficie interna real con respecto a la de referencia (Кузьменко & Самойленко, 2015)

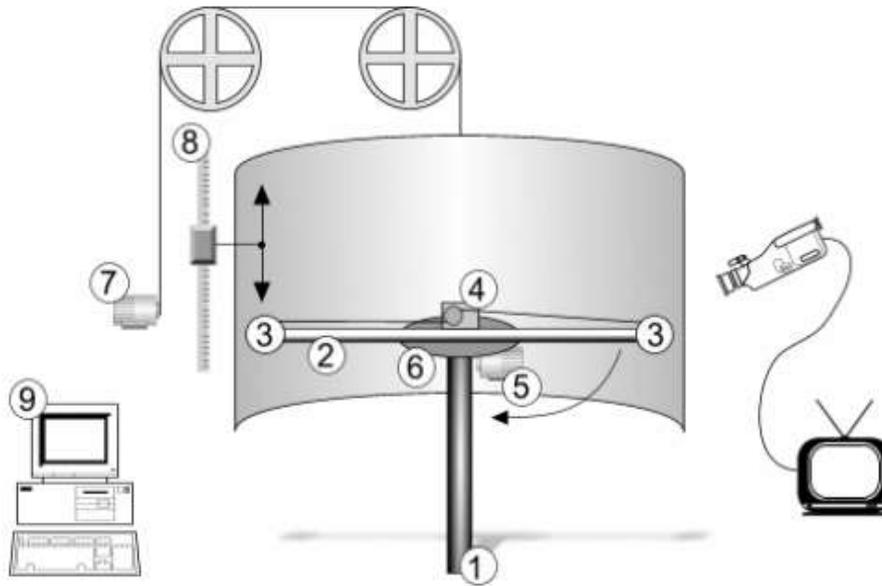
Anexo 4 Cinta de diámetro

(Schwenk, 2021)



Anexo 5 Brazo con sensores de distancia

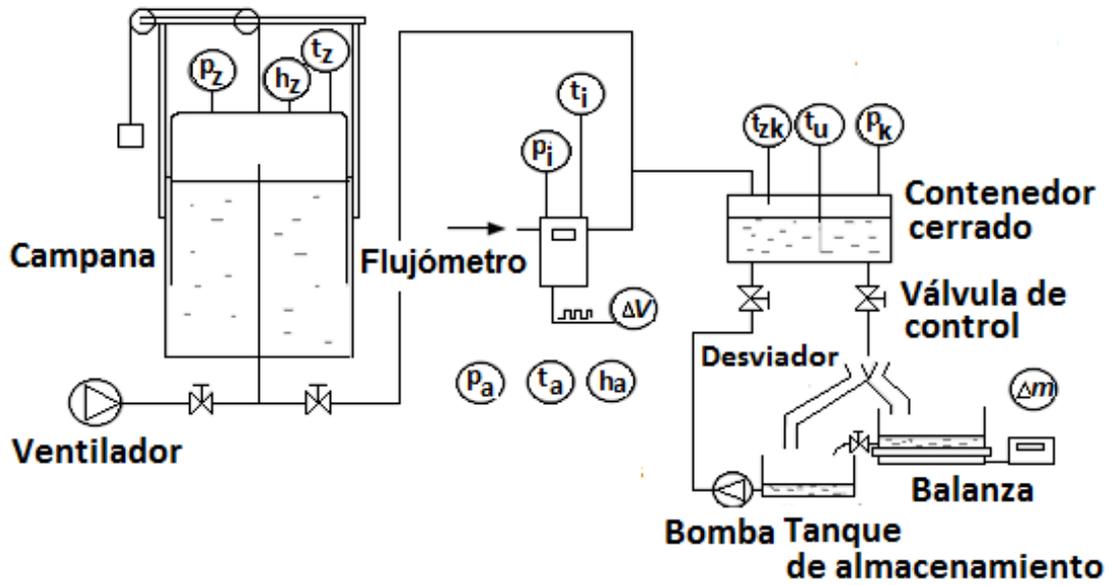
(Benkova, Makovnik, Mikulecky, & Zamecnik, 2011, pág. 166).



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

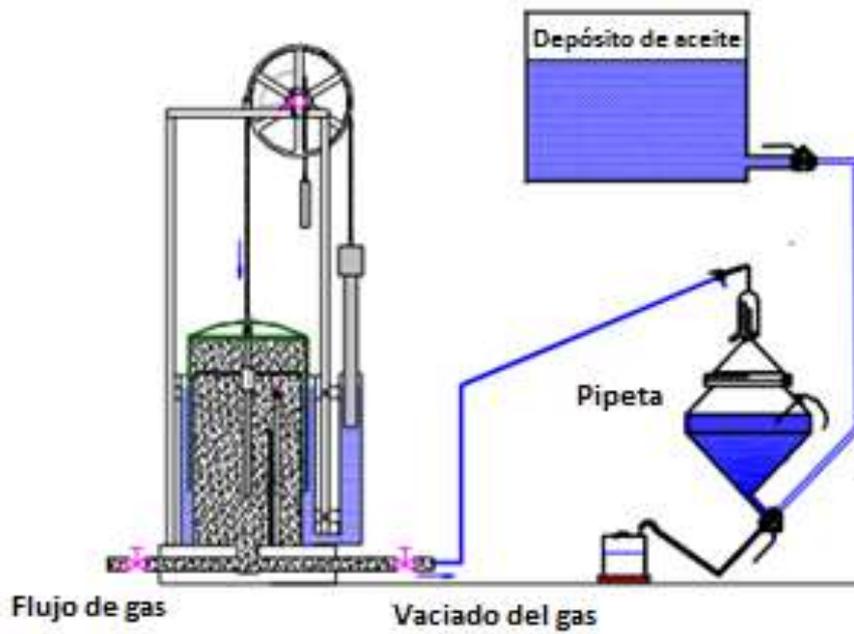
Anexo 6 Sistema de medición del método gravimétrico

(Pavlovic, Kozmar, & Šunić, 2008, pág. 299)

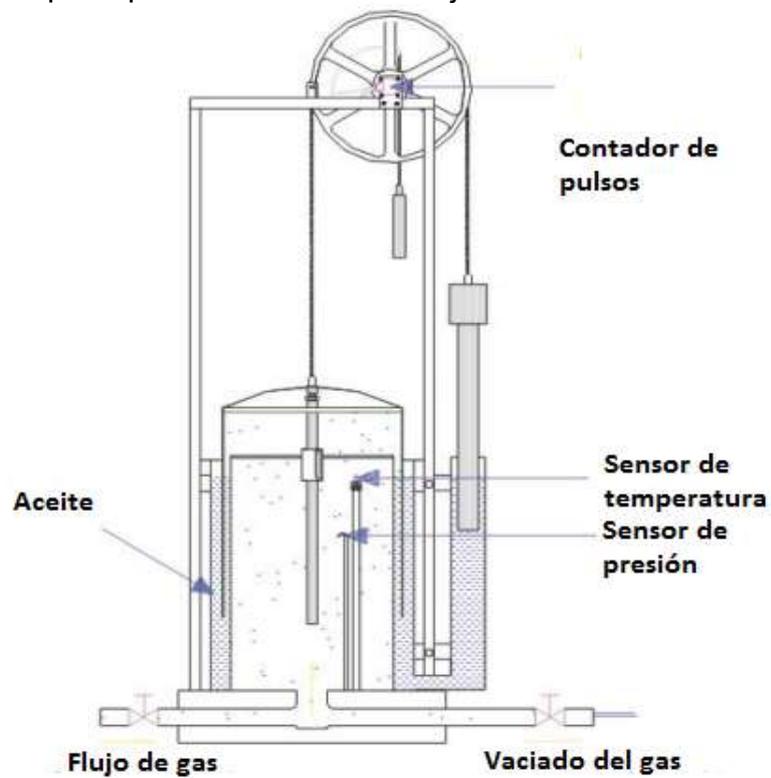


Anexo 7 Instalación de calibración por el método de desplazamiento

(Maldonado & Gervacio, 2004)

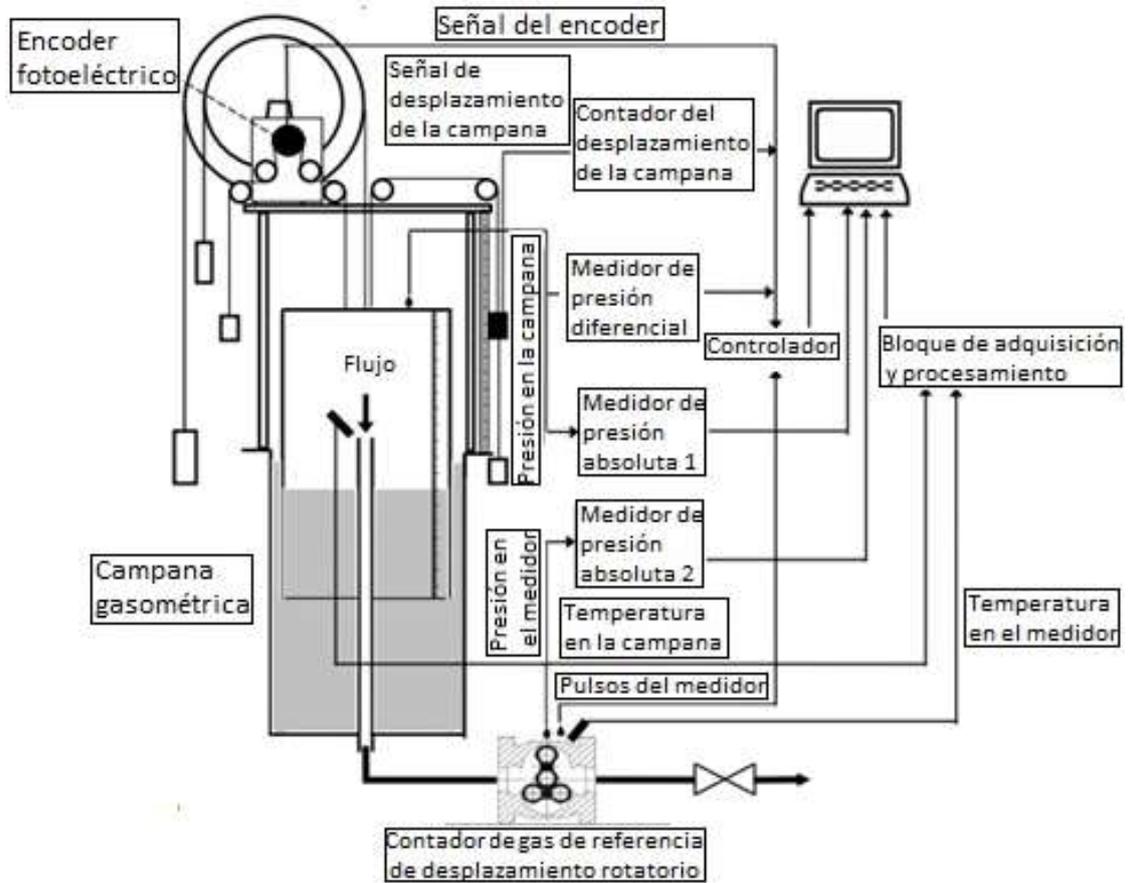


Patrón tipo campana para la medición de flujo volumétrico.



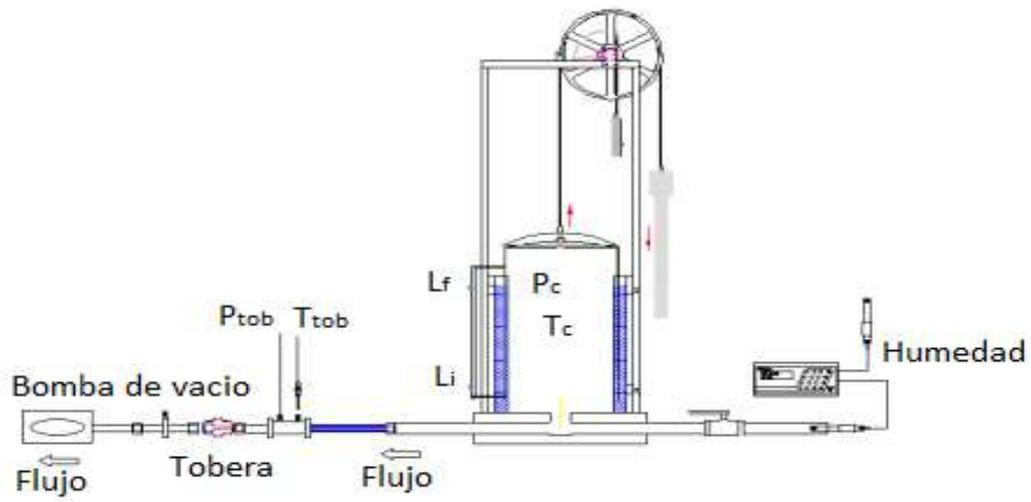
Anexo 8 Contador de gas de referencia de desplazamiento rotatorio

(Tonkonogij, Stankevičius, Bertašienė, & Tonkonogovas, 2015)



Anexo 9 Instalación de la tobera de flujo crítico

(Gervacio, 2010, pág. 5)



Anexo 10 Guía para la observación

1. Evidencia de la ejecución de la calibración
2. Condiciones ambientales del lugar dónde se encuentran las campanas con respecto a:
 - a. la temperatura del laboratorio,
 - b. la humedad relativa,
 - c. la presión atmosférica,
 - d. la variación máxima permisible de temperatura.
3. Examen exterior de las campanas gasométricas donde se comprueba que:
 - a. la campana, el canal artificial y el pilar guía están en posición vertical respecto a la superficie del fondo,
 - b. la escala es uniforme y clara,
 - c. el material de la campana es anticorrosivo y metálico,
 - d. la superficie de la campana no tiene arañazos o abolladuras,
 - e. las válvulas son flexibles para girar con un buen sellado y sin filtraciones,
 - f. todas las tuberías del dispositivo permanecen sin fugas,
 - g. se utiliza aceite como líquido de sellado,
 - h. la placa de identificación está fijada en una posición del dispositivo e indica el producto, modelo, nombre del fabricante, número de serie, fecha de fabricación y clase de exactitud.
4. Utilización al calibrar los metros contadores de gas.

Anexo 11 Tarifas de certificación de campanas gasométricas en Canadá

(Minister of Justice, Canada, 2018)

Determination of



Anexo 12 Modelo del Registro de Calibración de las campanas gasométricas

Registro de calibración

 Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología		R IC 205-36-00. Calibración de Campana Gasométrica				Revisión 0
No. registro:	No. De serie	Clase:	Marca:	Volumen nominal	Valor de división	Precio MN:
		Modelo:	País:			
				Rango de Flujo		
Patrones utilizados:				CONDICIONES AMBIENTALES:		
				Magnitudes	Inicial:	Final:
				Temperatura(°C): U=		
				Humedad rel.(%): U=		
				Pres. atm. (kPa): U=		
Documentos de referencia:						
Pertenece a:				Dirección:		

1. Examen exterior:

2. Comprobación del funcionamiento:

Prueba de hermeticidad:					
Inicial			Final		
Posición (cm):	Temperatura (°C): U=	Presión atmosf. (kPa): U=	Posición (cm):	Temperatura(°C): U=	Presión atmosf. (kPa): U=
Prueba de control de la presión dentro de la campana					
Flujo máximo			Flujo mínimo		
$\Delta P_{\text{máx}} 1$ (Pa)	$\Delta P_{\text{máx}} 2$ (Pa)		$\Delta P_{\text{máx}} 1$ (Pa)	$\Delta P_{\text{máx}} 2$ (Pa)	
Prueba de control de la variación de la temperatura					
ΔT_1 (°C)		ΔT_2 (°C)		ΔT_3 (°C)	

3. Determinación del Volumen Patrón de la Campana Gasométrica

Condiciones ambientales			Patrones utilizados:
Temperatura.(°C): U=	Humedad relativa (%): U=	Presión atmosf. (kPa): U=	
Puntos en la placa de escala, pulsos y distancia entre el punto inferior y superior (H)			
Punto inferior en la escala (mm)	Punto superior en la escala (mm)	Pulsos (pulsos)	H (mm)
Promedio (mm)	Promedio (mm)	Promedio (pulsos)	Promedio (mm)

Condiciones ambientales			Patrones utilizados:
Temperatura (°C): U=	Humedad relativa (%): U=	Presión atmosf. (kPa): U=	
Diámetro de la sección inferior, intermedia y superior (mm)			
	1	2	3
d_{inf}			
	4	5	6
d_{inter}			
	7	8	9
d_{sup}			

Condiciones ambientales			Patrones utilizados:	
Temperatura (°C): U=	Humedad relativa (%): U=	Presión atmosf. (kPa): U=		
Distancia promedio entre la superficie exterior de la campana y la superficie interior del tanque de acumulación exterior L(mm)				
L (mm)	1	2	3	4

Condiciones ambientales			Patrones utilizados:	
Temperatura (°C) : U=	Humedad relativa (%): U=	Presión atmosf.(kPa): U=		
Espesor de la placa de escala e (mm)				
e (mm)	1	2	3	
Ancho de la placa de escala B (mm)				
B (mm)	1	2	3	

Calibrado por:	Firma:	Fecha:
----------------	--------	--------