

# CALIBRACIÓN DEL PATRÓN NACIONAL DE FLUJO DE GAS POR EL MÉTODO DE DESPLAZAMIENTO

José M. Maldonado R., Juan Carlos Gervacio S.  
 Centro Nacional de Metrología, División Flujo y Volumen  
 Dirección de Metrología Mecánica  
 mmaldona@cenam.mx, jgervaci@cenam.mx

**Resumen:** El patrón nacional de flujo de gas tipo campana es un equipo que funciona bajo el principio de desplazamiento positivo; su alcance de medición parte de 30 L/min hasta 2 840 L/min; para alcanzar estos valores se emplean dos sistemas de medición (modelos FTBP-05 y FTBP-20). La calibración de dichos sistemas se refiere a la determinación de la relación entre los pulsos emitidos por el encoder rotatorio y/o lineal y el volumen desplazado por la campana. Se describe en este trabajo la calibración del modelo FTBP-05 (Flow Technology bell prover) por el método de desplazamiento, que asegura la trazabilidad hacia el patrón nacional de masa y que consiste en determinar la relación que existe entre el desplazamiento vertical de la campana (señal de pulsos) y el volumen desplazado por la misma.

## 1. INTRODUCCIÓN

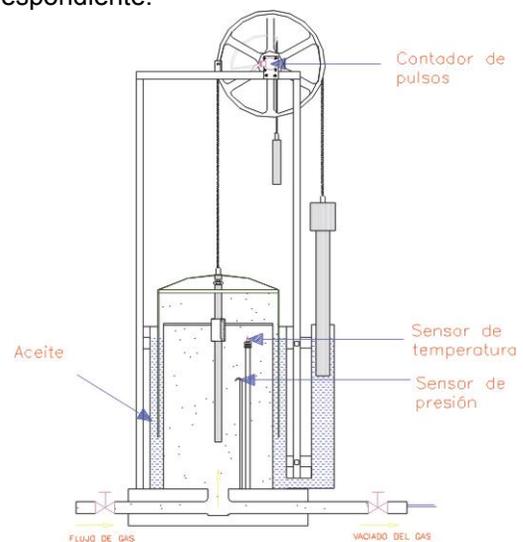
La exactitud en las mediciones de flujo volumétrico de gas en México es diseminada a través de la operación de tres patrones nacionales de desplazamiento positivo; uno de ellos es el patrón nacional de flujo de gas tipo campana modelo FTBP-05, con un volumen de desplazamiento de aproximadamente  $0,14 \text{ m}^3$  (ver figura 1).

Con este patrón se puede dar trazabilidad a los resultados de medición de equipos de medición de flujo de gas cuya señal de salida sea digital o analógica (medidores tipo turbina, toberas, vortex, de flujo laminar, rotativos, tipo diafragma, entre otros).

En el patrón nacional de flujo de gas FTBP-05 el desplazamiento vertical de la campana se mide a través de un encoder rotatorio (dispositivo de generación de pulsos) con una resolución de 5 000 pulsos por revolución, con cuatro salidas independientes; estas 4 señales de tipo senoidal entran a un circuito de interpolación para obtener un total de 200 000 pulsos (con señal tipo TTL) por revolución.

Uno de los objetivos principales del CENAM es el mantenimiento y mejora continua de los patrones nacionales. En este sentido, en este documento se informan los resultados de los trabajos de calibración que se han realizado sobre el Patrón Nacional de Flujo de Gas, con la finalidad de disminuir la incertidumbre en el valor de la

constante  $K$  y la incertidumbre de medición correspondiente.



**Fig. 1** Patrón tipo campana para la medición de flujo volumétrico.

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El patrón nacional de flujo de gas tipo campana, es un medidor de flujo volumétrico del tipo de desplazamiento positivo. Su principio de funcionamiento se basa en la determinación simultánea del volumen de aire desplazado en la parte interna de una campana (cilindro cerrado en uno de sus extremos) y el tiempo en el cual se realiza dicho desplazamiento de volumen. Este desplazamiento se debe realizar a una presión y

temperatura “cuasi” constantes, es por ello que para evitar fricción en el desplazamiento de la campana esta se encuentra sumergida en un anillo de aceite. La presión interna es ligeramente mayor que la presión atmosférica, esta presión se logra debido al uso de un contrapeso de la campana, el cual además de tener la función de mantener cierto nivel de “sobre-presión” en el interior de la campana, también permite mantener invariable el nivel de aceite ya que la sección transversal del cuerpo de la campana es la misma que la del contrapeso. Adicionalmente, la campana cuenta con un contrapeso periférico acoplado a una leva de perfil especial para compensar la fuerza de flotación que deja de ejercer el aceite sobre la campana al desplazarse; de esta manera la presión interna (relativa) de la campana permanece constante (con límites de  $\pm 3$  Pa).

La medición de volumen puede realizarse mientras la campana se desplaza en dirección ascendente o bien descendente. La calibración a la que se refiere este documento se realizó en dirección descendente. En cualquiera de los dos modos de operación, la constante de calibración  $K$  se considera la misma.

Cuando se utiliza la campana para determinar los factores de corrección de un medidor de flujo de gas se utiliza el siguiente modelo matemático.

$$fc = \frac{V_{PN}}{V_{mN}} = \frac{\left(\frac{C}{K}\right) Z_m T_m P_p}{V_m Z_p T_p P_m} \quad (1)$$

Los subíndices  $p$  y  $m$  se refieren al patrón y medidor bajo calibración respectivamente;  $V_{PN}$  y  $V_{mN}$  corresponden al volumen a condiciones normalizadas;  $Z$  es el factor de compresibilidad,  $T$  es la temperatura absoluta,  $P$  es la presión absoluta,  $C$  es el total de pulsos generados por el encoder,  $K$  es la constante de calibración de la campana en pulsos por unidad de volumen y  $fc$  representa el factor de corrección del medidor bajo calibración [2].

De acuerdo con la ecuación anterior, es indispensable determinar la constante de calibración  $K$  por alguno de los métodos de calibración: método dimensional y/o el método de desplazamiento de fluido.

### 3. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

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

Existen dos técnicas genéricas para la obtención de la constante de calibración  $K$ ; la primera, conocida como de desplazamiento de agua (del inglés, *water draw*), y la técnica puramente dimensional. Cuando se aplica la técnica de desplazamiento de agua se logra trazabilidad al Patrón Nacional de masa, mientras que aplicando la segunda técnica se logra trazabilidad al Patrón Nacional de Longitud.

#### 3.1 Método dimensional

Este método consiste en determinar el diámetro interno promedio de la campana, para ello se hace uso de una cinta especial (conocida como  $\pi$  tape), de cuya escala de medición se obtiene directamente el diámetro externo del artefacto. Alternativamente, el diámetro interior de la campana puede medirse usando una máquina de medición por coordenadas de tamaño conveniente [3]

Para determinar el diámetro promedio de la campana se mide el diámetro externo de la campana en diferentes secciones, repitiendo este procedimiento por lo menos 5 veces; de estas mediciones se calcula el diámetro promedio de la campana. La calibración del desplazamiento vertical se realiza con un interferómetro láser, contabilizando el número de pulsos generado por el encoder en un determinado desplazamiento vertical de la campana; al combinar el diámetro promedio de la campana y la constante del desplazamiento vertical (pulsos/mm) se puede obtener la constante de pulsos por unidad de volumen, según la siguiente ecuación,

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

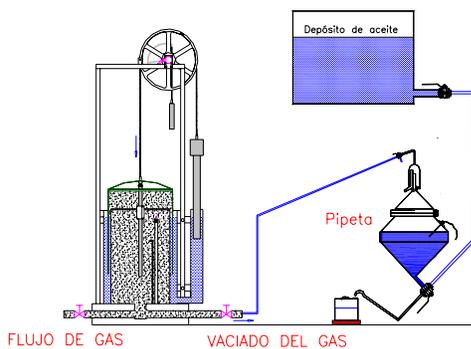
donde:

$K_L$ : Constante lineal (pulsos por unidad de longitud)  
 $D$ : Diámetro interno de la campana

### 3.2 Método de desplazamiento

Este método puede realizarse de modo volumétrico o gravimétrico, en ambos casos se utiliza un recipiente auxiliar (pipeta) que se interconecta con la campana; el arreglo de interconexión se diseñó con la finalidad de que las diferencias de presión entre la campana y el recipiente auxiliar sean despreciables (ver figura 2).

Al desalojar el aceite del recipiente auxiliar este volumen es ocupado por el gas proveniente de la campana; de manera, que si se conoce la masa, la temperatura y la densidad de aceite entonces es posible determinar el volumen de la pipeta, que se asume es el volumen de gas desplazado por la campana. Conocido el volumen desplazado por la campana, resta entonces relacionarlo con el número de pulsos generados por el encoder durante este desplazamiento para calcular la constante **K**.



**Fig. 2** Diagrama esquemático del arreglo de calibración de la campana FTBP-05.

El recipiente auxiliar utilizado es una pipeta volumétrica de 20 L, fabricada en acero inoxidable con acabado superficial interno tipo espejo y sensor de temperatura integrado; su volumen se define por rebosamiento y para el llenado y vaciado la pipeta cuenta con una válvula de tres vías en la parte inferior, en uno de los puertos se conecta el suministro de aceite y en el otro se instala un tubo de vidrio con una forma tal que permite se genere una columna de aceite al vaciar la pipeta. La columna de aceite que se genera es función de la presión interna de la campana de manera que al igualarse la presión interna de la campana con la columna de aceite la campana detiene su movimiento y se puede contabilizar el número de pulsos generados. Es de destacar que la formación de la columna de aceite en la parte inferior de la pipeta es de vital importancia para obtener una buena repetibilidad en el número de pulsos generados por el encoder. De hecho, la calibración

de la pipeta volumétrica se realizó bajo las mismas condiciones de uso que prevalecerían en la calibración de la campana (incluido el tipo de aceite). Dicha calibración se realizó por el método gravimétrico, aplicando el método de doble sustitución en las mediciones de masa correspondientes.

Las condiciones ambientales juegan 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 **K** de calibración de la campana. La temperatura es la magnitud que mas influye en el proceso de calibración, porque el método de calibración supone que la temperatura del gas contenido en la campana es la misma que cuando pasa al interior de la pipeta. Diferencias de temperatura entre campana y pipeta mayores que 0,3 °C pueden amenazar seriamente la repetibilidad de los valores para **K**.

La presión del gas se mide en el interior de la campana y se asume que es la misma en el interior de la pipeta cuando esta vacía, adicionalmente se mide la presión atmosférica. La humedad del aire se mide empleando sensores colocados 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 resulta.

$$K = \frac{C}{V_p \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_c \cdot (T_c - 20))} \quad (3)$$

$$V_p = V_{20} \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_p - 20)) \quad (4)$$

donde

- C**: Número de pulsos generados, [pulsos]
- V<sub>p</sub>**: Volumen de la pipeta a la temperatura cuando esta vacía después de realizar la prueba, [L]
- α<sub>c</sub>**: Coeficiente lineal de expansión térmica del material de fabricación de la campana, [1/°C]
- V<sub>20</sub>**: Volumen de la pipeta a 20 °C, [L]
- α<sub>p</sub>**: Coeficiente cúbico de expansión térmica del material de fabricación de la pipeta, [1/°C]
- T<sub>p</sub>**: temperatura de la pipeta vacía, [C]
- T<sub>c</sub>**: Temperatura en la campana, [°C]

**4. PROCEDIMIENTO**

Una descripción de los equipos empleados para determinar **K** se listan en la tabla 1. Todos los resultados de calibración de dichos instrumentos tienen trazabilidad a los patrones nacionales, a partir de los programas de calibración vigentes en cada una de las magnitudes físicas involucradas.

Equipo	Alcance	Incertidumbre k=2
Pipeta volumétrica	20,027 5 L (a 20 °C)	5,17 mL
Sensores de temperatura	(0 – 60) °C	0,01 °C
Sensor de presión	(0 – 800) kPa	9 Pa
Contador universal	10 MHz	3·10 <sup>-10</sup>
<b>Monitoreo ambiental</b>		
Sensores de presión	(0 – 100) kPa	10 Pa
Temperatura	0 °C a 60 °C	0,1 °C
Humedad	0 % a 99 %	5 %

**Tabla 1** Equipo de medición usado durante la calibración de la campana FTBP-05

Además de los instrumentos listados en la tabla 1, se usó aceite tipo dieléctrico cuyos valores de densidad y viscosidad cinemática a 20 °C son 859,8 kg/m<sup>3</sup> y 19,43 mm<sup>2</sup>/s, respectivamente.

En los párrafos siguientes se detalla el procedimiento de calibración

1. Instalar todos los equipos y el aceite en el laboratorio, 24 horas antes de realizar las pruebas para lograr un equilibrio térmico entre el ambiente, equipos y aceite.
2. Llenar y vaciar la campana 5 veces antes de iniciar las pruebas, con la finalidad de que el aire con el que se llena la campana logre un equilibrio térmico con los diferentes componentes.
3. Permitir un tiempo de escurrimiento de 15 minutos para minimizar el volumen de aceite adherido en el interior de la campana.
4. Colocar el puerto de conexión a la atmósfera en la válvula de 3 vías.

5. Llenar la pipeta de aceite.
6. Cuando la pipeta está llena y el aceite aparece en la cámara de rebosamiento de la pipeta, cerrar la válvula asegurando que el nivel de aceite esté por encima del nivel de rebosamiento.
7. Conectar la campana a la pipeta por medio de la válvula de tres vías.
8. Abrir la válvula de la cámara de rebosamiento y drenar el aceite de la misma, hasta un nivel en el que el tubo de rebosamiento este por encima del espejo de aceite.
9. Registrar los valores de condiciones ambientales, de temperatura del aire en la campana, de la temperatura del aceite en la pipeta y la presión en la campana.
10. Inicializar el contador de pulsos.
11. Vaciar la pipeta, colectando el aceite en un recipiente. Cuando la pipeta se vacía y se genera la columna de aceite en el tubo de descarga, se permite un tiempo de escurrimiento y estabilización de 30 segundos y se cierra la válvula.
12. Medir la temperatura del aire en la campana, en la pipeta vacía, la presión en el interior de la campana y el número de pulsos generado por el encoder de la campana debido al desplazamiento.
13. Accionar la válvula de tres vías para abrir la pipeta a la atmósfera y llenarla de aceite.
14. Repetir los puntos del 6 al 12 siete veces para completar 140 L.

La secuencia descrita se ejecutó 9 veces, los datos promedio se muestran en la tabla 2.

<b>V<sub>nominal</sub></b>	<b>T<sub>c</sub></b>	<b>T<sub>p</sub></b>	<b>V<sub>acum</sub></b>	<b>Pulsos</b>
	°C	°C	L	P
140	19,56	19,85	140,194	76 147
120	19,56	19,85	120,166	65 285
100	19,57	19,85	100,138	54 417
80	19,57	19,85	80,111	43 506
60	19,56	19,84	60,083	32 609
40	19,56	19,83	40,055	21 736
20	19,55	19,85	20,028	10 873

**Tabla 2** Resultados promedio de las nueve transferencias desde la campana hacia la pipeta.

En la tabla 2,  $T_p$  representa la temperatura en el interior de la pipeta; sin embargo es de destacar que debido a que el sensor de temperatura con el cual se realiza esta medición se encuentra en contacto directo con el aceite, no es entonces posible atribuir dicho valor de temperatura al gas que ocupa la pipeta una vez que se ha vaciado la pipeta. Se incluye en la tabla solo para dar referencia del nivel de estabilidad y de equilibrio térmico entre los componentes del sistema de calibración.

$V_{nominal}$	datos	$s(T_c)$	$S(T_p)$	$s(V_{acum})$	$s(pulsos_{acum})$
		°C	°C	L	pulsos
140	49	0,06	0,09	0,0004	42,0
120	54	0,06	0,11	0,0005	39,6
100	45	0,06	0,12	0,0004	36,4
80	36	0,06	0,11	0,0003	35,8
60	27	0,07	0,11	0,0003	28,9
40	18	0,07	0,12	0,0002	15,9
20	9	0,06	0,11	0,0001	11,8

**Tabla 3** Variaciones (representadas en forma de una desviación estándar) de las variables principales.

Los valores que se muestran en la tabla 3 dan información respecto de las variaciones experimentadas durante los nueve ejercicios de transferencia de gas desde la campana hacia la pipeta volumétrica. Se aprecia que la repetibilidad del proceso de calibración se indexa en un

porcentaje alto a la variabilidad de los pulsos acumulados.

**5. INCERTIDUMBRE**

La incertidumbre de  $K$ , se determina usando el modelo matemático siguiente, y su cálculo se basa en la "Guía para Estimación de la Incertidumbre en las Mediciones" [4]

$$K = \frac{C}{N \cdot V_{20} \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_p - 20)) \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_c \cdot (T_c - 20))}$$

Los cálculos de incertidumbre se realizaron bajo las siguientes consideraciones:

- Las variables de entrada se asumen mutuamente independientes.
- La incertidumbre del volumen de la pipeta es el resultado de la combinación de la incertidumbre de calibración y la desviación estándar del volumen acumulado para las 9 pruebas realizadas.
- La incertidumbre de la temperatura de la pipeta y la temperatura de la campana es el resultado de la combinación de la incertidumbre de calibración del sensor y la desviación estándar de las mediciones de temperatura, tomando en cuenta todas las mediciones de temperatura de las 9 transferencias.

En la tabla 4 se presenta el presupuesto de incertidumbre para el volumen acumulado de 140 litros.

Variable	Valor	u	Distribución	Grados de libertad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución Pulsos/L
C	76 146,9 pulsos	15,9 pulsos	A, Normal	6	0,007 1	0,11
N	7	0,0				
$V_{20}$	20,0275 L	0,002 6 L	B, Normal	200	-27	-0,071
$\alpha_p$	0,000 047 7/°C	0,000 001 4/°C	B, Rectangular	50	81	0,000 11
$T_p$	19,85 °C	0,09 °C	B, Normal	48	-0,026	-0,0023
$\alpha_c$	0,000 031 8/°C	0,000 000 9/°C	B, Rectangular	50	-480	-0,000 44
$T_c$	19,56 °C	0,06	B, Normal	53	0,035	0,0021
K	543.15	0,134 pulsos/L	B, Normal	11		

**Tabla 4.** Presupuesto de incertidumbre

En la tabla 5 se resumen los resultados de calibración en la determinación de  $K$ . Como era de esperarse, a menor volumen de gas transferido hacia o desde la campana, mayor es la incertidumbre de medición. Las variaciones en el valor de  $K$ , respecto de la altura (relacionada con el volumen transferido) se explican por el proceso de fabricación de la campana. Este hecho se ha confirmado de manera independiente a través de mediciones del diámetro de la campana por diferentes métodos [5].

$V_{nominal}$	$K$	$U, k=2$	$U, k=2$
	Pulsos/L	Pulsos/L	%
140	543,15	0,29	0,054
120	543,29	0,29	0,052
100	543,42	0,31	0,057
80	543,08	0,37	0,068
60	542,73	0,39	0,072
40	542,64	0,33	0,061
20	542,90	0,47	0,087

**Tabla 5** Resultados de calibración de la campana FTBP-05

## 6. CONCLUSIONES

La calibración del Patrón Nacional para medición de flujo de gas tipo campana, modelo FTBP-05 fue realizada exitosamente mediante el método conocido como de desplazamiento, usando como referencia un patrón volumétrico de capacidad previamente determinada.

Los resultados de medición de volumen y/o flujo de gas obtenidos con la campana son trazables al Patrón Nacional de Masa.

Tanto la mejor estimación como la incertidumbre de la constante de calibración  $K$  dependen del volumen de gas transferido. La incertidumbre tiene un valor mínimo de 0,052 % cuando la campana es usada para transferir o recibir 120 L; mientras que la incertidumbre mayor para  $K$  corresponde a operaciones donde el volumen transferido es de 20 L.

Las dos fuentes de incertidumbre mas importantes en la determinación de la constante  $K$  son la repetibilidad de los pulsos y la calibración de volumen del recipiente auxiliar. La incertidumbre puede mejorarse mediante la aplicación de un procedimiento de calibración del tipo gravimétrico,

siempre y cuando las condiciones ambientales de temperatura en el laboratorio permitan tener diferencia de temperatura entre la campana, la pipeta y el aceite de 0,05 °C; sin embargo, los valores de incertidumbre obtenidos son adecuados a los requerimientos de los servicios de calibración que actualmente ofrece el CENAM y similares a los que ofrecen otros institutos nacionales de metrología.

La disminución en la incertidumbre de la constante  $K$  permitirá ofrecer servicios de calibración con incertidumbre mejor que 0,2%.

Este método toma en cuenta de manera implícita los defectos de forma que pueda tener la campana y los acoplamiento mecánicos entre la campana y encoder en la determinación de la relación de pulsos y volumen.

## 7. REFERENCIAS

- [1] EG&G "Certificado de calibración, probador tipo campana FTBP-10", EG&G, 1993.
- [2] Beck H. V., "Calibration of bell provers", American Gas Association, September 1994.
- [3] Aschenbrenner A., Brunnemann H., Die Gasmessglocke –ein Basisnormalgerät zur Darstellung der Volumeneinheit für Gase, PTB-Bericht, 1984.
- [4] ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995
- [5] Maldonado R. J.M., "Proyecto de la División de Flujo y Volumen", sin publicar.