

# REDISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL PATRÓN NACIONAL PARA MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS

Juan J. Mercado P., José M. Maldonado R.  
Centro Nacional de Metrología, División Flujo y Volumen  
Dirección de Metrología Mecánica

Tel.: 01 (442) 2 11 05 01 al 04, ext. 3816 y 3766; [jmercado@cenam.mx](mailto:jmercado@cenam.mx), [mmaldona@cenam.mx](mailto:mmaldona@cenam.mx)

**Resumen** El patrón nacional de flujo de gas es un sistema de medición de desplazamiento positivo tipo campana con un alcance de medición de 100 L/min a 2 800 L/min. El sistema cuenta con un elemento generador de pulsos del tipo rotativo para medir el desplazamiento vertical de la campana, teniendo como principal desventaja la baja resolución del generador. El objetivo de la implementación de una regla lineal en lugar del generador del tipo rotativo, es disminuir la incertidumbre de medición del volumen desplazado, al igual que mejorar las condiciones de calibración del sistema de medición de desplazamiento vertical de la campana y ampliar las capacidades de calibración del patrón nacional.

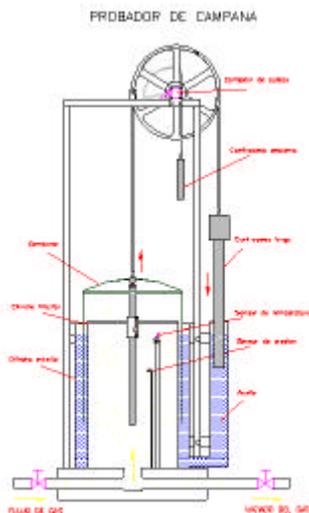
Se exponen en este trabajo los conceptos de re-diseño del sistema de medición para el desplazamiento vertical del patrón nacional de flujo de gas y se incluyen los resultados relativos a la variación de temperatura y presión, obtenidos después de la implementación del diseño.

Se espera aumentar la resolución del desplazamiento de la campana, conocer la distribución de temperatura y presión durante su recorrido y tener trazabilidad a la magnitud de longitud calibrando la regla lineal por medio de un interferómetro, todo esto con la finalidad de disminuir la incertidumbre asociada a la constante de calibración del patrón nacional de flujo de gas.

## INTRODUCCIÓN

La exactitud en las mediciones de flujo volumétrico de gas, es diseminada a través de tres patrones nacionales de desplazamiento positivo; uno de ellos es el patrón nacional de flujo de gas tipo campana, con un volumen de desplazamiento de aproximadamente  $0,6 \text{ m}^3$ .

El patrón nacional de flujo de gas es el origen de la cadena de trazabilidad en nuestro país en materia de medición de flujo de gas, permitiendo que la industria realice mediciones confiables con niveles de incertidumbre adecuados a sus requerimientos en sus procesos y transacciones comerciales mediante los servicios de calibración que ofrece el CENAM.



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

La medición de flujo de gas requiere no solamente de medir el volumen o masa y el tiempo; sino también la presión y la temperatura del gas. Así, el patrón nacional de flujo de gas tiene trazabilidad a los patrones nacionales de longitud, masa, tiempo, temperatura y presión.

El patrón nacional de flujo de gas FTBP-20 (marca EG and G), cuenta con un encoder rotatorio con una resolución de 2 500 pulsos por revolución, pensado para proporcionar trazabilidad a medidores de flujo cuya señal de salida sea la generación de pulsos (Turbinas), ya que aplican una sincronización de señales y doble cronometría para la calibración de los medidores para lo cual es aceptable la resolución del encoder. El problema fundamental es cuando se requiere la calibración de algún medidor con lectura

mecánica o analógica (medidor tipo: diafragma, húmedo, rotámetro, etc.), ocasionando que la sincronización se realice en forma manual, y para estos casos en particular la resolución del encoder no es aceptable ya que incrementa considerablemente la incertidumbre.

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 re-diseño y caracterización que se han realizado sobre el Patrón Nacional de Flujo de Gas, con la finalidad de disminuir la incertidumbre de medición asociada a la constante de calibración  $K$ .

### 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 un cilindro cerrado en uno de sus extremos (campana, -ver figura 1-) y el tiempo en el cual se realiza dicho desplazamiento de volumen.

La medición de volumen puede realizarse mientras la campana se desplaza en forma ascendente o bien en dirección descendente. Aún cuando el Patrón Nacional es operado solamente en modo ascendente, en el proyecto de re-diseño se ha contemplado la necesidad de usarlo en ambos modos (ascendente y descendente).

En cualquiera de los dos modos de operación, la calibración de los medidores de volumen requiere de la medición del desplazamiento vertical de la campana, según se indica en la siguiente ecuación,

$$f_c = \frac{(h \cdot A_i) Z_m T_m P_p}{V_m Z_p T_p P_m} = \frac{(C/K) Z_m T_m P_p}{V_m Z_p T_p P_m} \quad (1)$$

en la ecuación anterior los subíndices  $p$  y  $m$  se refieren al patrón y medidor bajo calibración, respectivamente;  $Z$  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 pulsos por litro generados por la campana y  $f_c$  representa el factor de corrección del medidor bajo calibración [3].

De acuerdo con la ecuación anterior, y con los procedimientos de calibración observados, la medición del desplazamiento vertical de la campana tiene una influencia apreciable en la incertidumbre del factor de corrección del medidor bajo calibración.

### MOTIVACIÓN

Disminuir la incertidumbre de la constante de calibración  $K$  por la medición del desplazamiento vertical de la campana.

- Mantener la incertidumbre estándar combinada del volumen desplazado de la campana a niveles del orden de 0,05% o menores.
- Lograr trazabilidad a los patrones nacionales de longitud, masa, tiempo, temperatura y presión, al realizar mediciones de flujo de gas desde 100 L/min hasta 2 800 L/min.

### CALIBRACIÓN DEL PATRÓN.

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.

De acuerdo con el certificado de calibración vigente, El valor de la  $K$  es de 1,692 691 pulsos/litro [1], el cual representa un desplazamiento de 909 micras por cada pulso generado, con una sección transversal promedio de 0,649 852 m<sup>2</sup>. Dicha resolución es muy pobre, si se toma en cuenta que existe un buen número de equipos de medición de volumen de gas cuya señal de salida no puede ser sincronizada con la señal del patrón de referencia.

Para solucionar este problema se reemplazará el encoder rotatorio por un encoder lineal con una resolución que es por lo menos 100 veces mejor que la del encoder rotatorio.

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para poder reemplazar el encoder rotatorio por un encoder lineal fue necesario modificar la forma en la cual la campana es guiada, limitándola a un grado de libertad en su movimiento .

Los aspectos más importantes del diseño incluyen:

- Selección de un encoder lineal.
- Selección del juego de guías para mantener el desplazamiento de la campana a un grado de libertad.
- Diseño de las bases de las guías.
  - de las estructuras para soportar las guías.
  - de los sujetadores de la campana.
  - del soporte del lector del encoder lineal.
  - del soporte del encoder lineal.
- Instalación de un termómetro de líquido en vidrio en la campana para comparar las mediciones de temperatura
- Reducir el “*volumen muerto*” del interior de la campana con el fin de disminuir los gradientes de temperatura.

## RESTRICCIONES

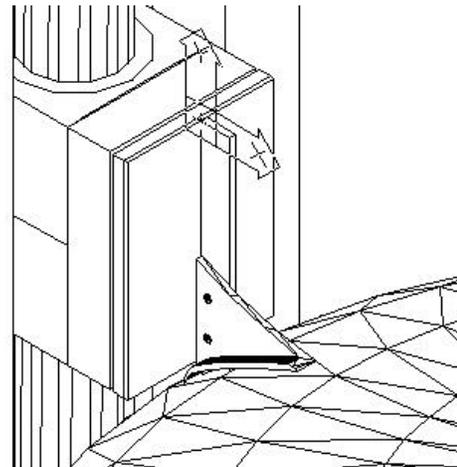
Las restricciones en el diseño se presentan a continuación:

- El encoder lineal debe tener una resolución igual mejor que 0,010 mm, a lo largo del desplazamiento de la campana. La longitud de la regla lineal debe ser del orden de 950 mm, de tal forma que el volumen que pueda ser cuantificado sea del orden de 600 dm<sup>3</sup>.
- La campana contará con dos guías para garantizar el desplazamiento en un grado de libertad y que sea estáticamente determinado.
- La fricción que generen los rodamientos, deberá ser mínima.
- La base del lector del encoder, deberá tener seis grados de libertad.
- Los soportes de las guías deberán permitir su alineación paralela y vertical
- Los soportes del encoder lineal deben tener 6 grados de libertad para alinear el encoder a la trayectoria de la campana.
- Garantizar la hermeticidad de la campana.

## RESULTADOS

### Encoder.

El encoder que se seleccionó tiene un alcance de medición de 1 020 mm, con una resolución de 5µm; lo que significa que el volumen total que puede ser cuantificado es del orden de 663 dm<sup>3</sup>. Si se toma en cuenta que el encoder rotatorio original tiene una resolución de desplazamiento lineal de 909,1µm entonces la resolución en el volumen mínimo de gas que puede ser medido por el patrón mejorará desde 600 cm<sup>3</sup> a 324 cm<sup>3</sup>.



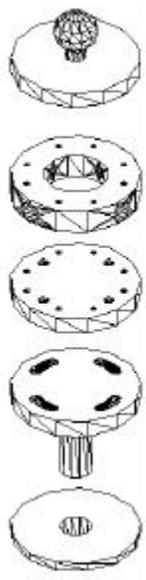
**Fig. 2** Detalle de acoplamiento entre la campana y el cojinete de aire.

### Diseño

Se utilizan dos guías que se ubican en los extremos de la campana de tal manera que el plano imaginario que intersecta los centros de ambas guías pasa por el centro de la circunferencia de la campana

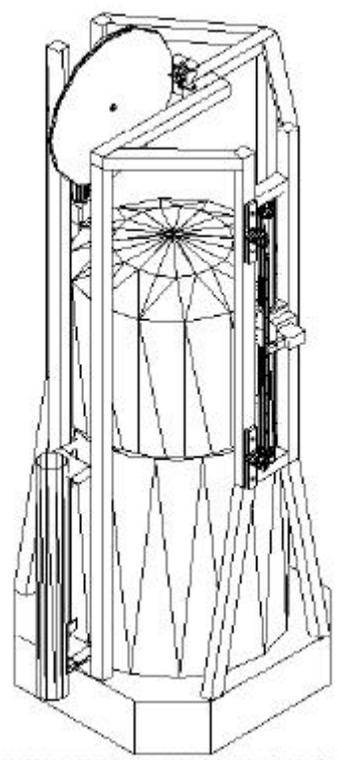
La unión entre la campana y los rodamientos neumáticos que se muestra en la figura 2, absorbe un grado de libertad en el eje *x*, debido a que la unión permite desplazamiento en esa dirección; la finalidad de esta unión con ese grado de libertad es la de garantizar que el mecanismo sea estáticamente determinado, además de permitir la absorción de posibles deformaciones térmicas de la campana y una mala alineación de las guías.

Las bases de las guías deben poder ajustarse para garantizar el paralelismo entre ellas y entre la trayectoria que describe la campana (la vertical). En la figura 3 se muestra la base en la cual descansa la guía.



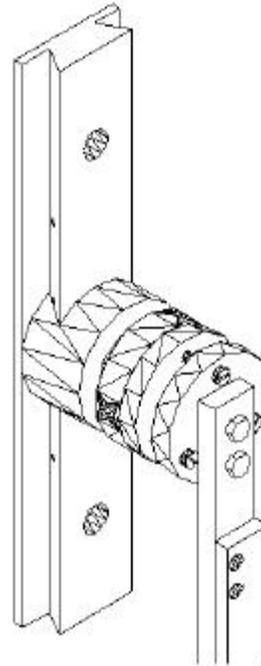
**Fig. 3** Base para guía.

La estructura se fabricó con PTR, anclado en la base del patrón nacional y sujeto en la parte superior de la estructura original del patrón (ver fig. 4).



**Fig. 4** Estructura en el patrón nacional de flujo de gas.

El encoder lineal debe tener la capacidad de alinearse con la trayectoria de la campana, razón por la que el mecanismo que sujeta la base del encoder lineal debe tener 5 grados de libertad (ver fig. 5)

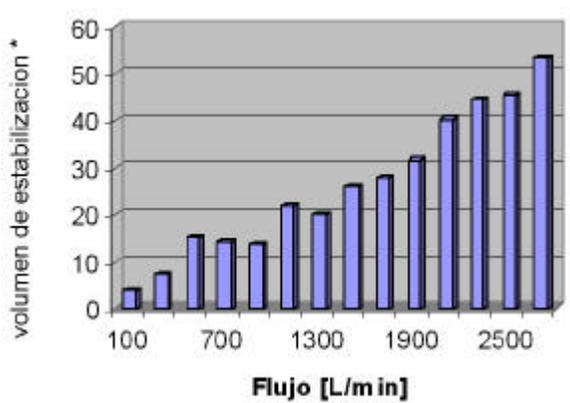


**Fig. 5** Mecanismo del soporte del encoder lineal.

### Variaciones de presión relativa

La fricción que pueda existir a lo largo del desplazamiento de la campana se refleja de manera directa en las variaciones de la presión relativa en el interior de la campana. Para cuantificar el efecto de la fricción de los componentes móviles sobre la presión en el interior de la campana se realizaron diferentes ejercicios.

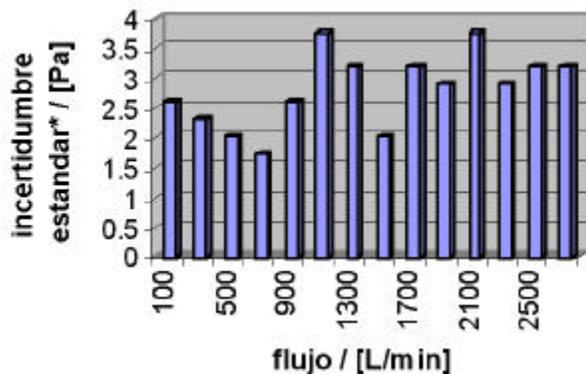
En la gráfica 1 se aprecia el efecto del flujo volumétrico sobre el volumen de estabilización. En la parte inferior del alcance de medición (100 L/min) se requiere permitir que la campana se desplace aproximadamente 10% de su recorrido total antes de alcanzar condiciones estables de presión en el interior de la campana; a flujo máximo se requiere de un volumen de estabilización de casi 50% del total disponible.



**Gráfica 1** Volumen de estabilización requerido para alcanzar condiciones estables de presión relativa en el interior de la campana

\* porcentaje respecto del volumen total disponible

En la gráfica 2 se muestran los valores de incertidumbre estándar [2] de la presión interna asociada a las variaciones máximas en el interior de la campana, como función del flujo volumétrico. La incertidumbre ha sido cuantificada considerando una distribución de probabilidad uniforme para la presión relativa en el interior de la campana.



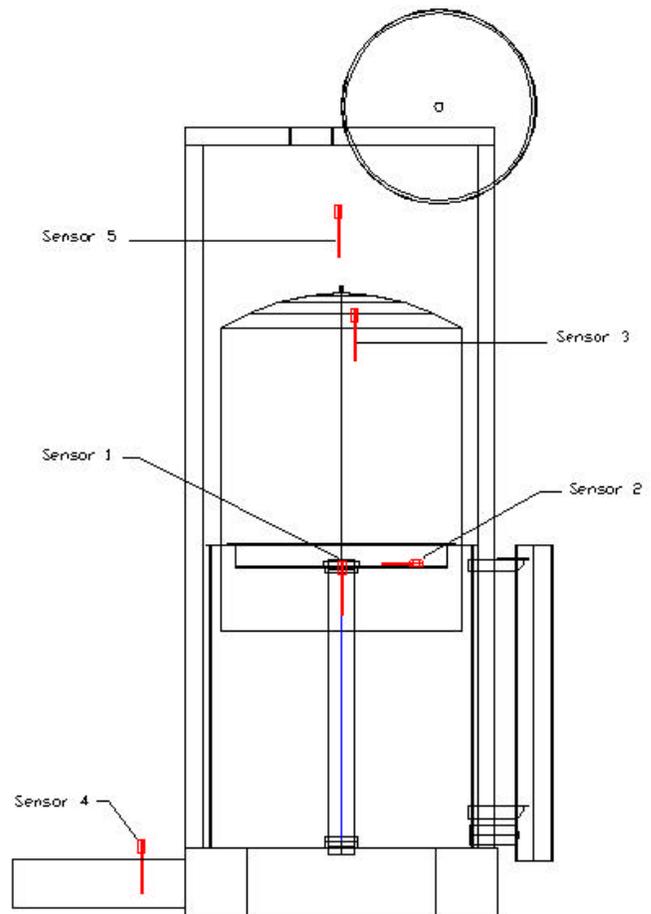
**Gráfica 2** Incertidumbre estándar de la presión interna asociada a la variación en el interior de la campana.

### Variaciones de temperatura

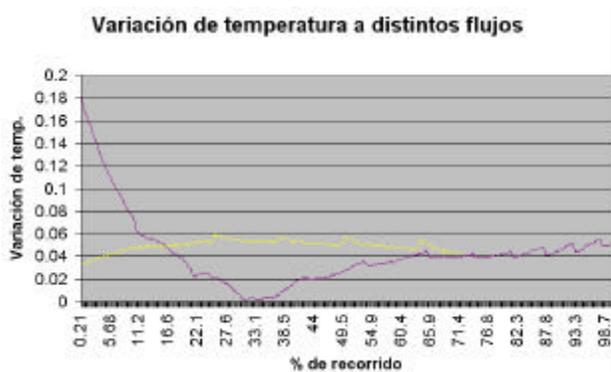
Es tan importante conocer las variaciones de la temperatura en el interior de la campana como las variaciones de presión durante el recorrido de la misma, en virtud de que ambos fenómenos han de tomarse en consideración durante el análisis de incertidumbre del volumen de gas medido por el patrón.

Para conocer las variaciones de temperatura en el interior de la campana, se colocaron cinco sensores en el patrón nacional de flujo de gas, tres de ellos se situaron en el interior de la campana como se muestra en la figura 6.

De igual forma que para la medición de las variaciones de presión, las señales de los sensores de temperatura fueron adquiridas en forma automática mediante software y hardware adecuados. En la gráfica 3 se muestra que la máxima variación de temperatura en el interior de la campana es del orden de 0,2 °C para el recorrido total de la campana. Dichas variaciones se observan entre la temperatura en la parte superior de la campana (sensor 3) y la temperatura en la base de la campana (sensor 2) –ver figura 6-.



**Fig. 6** Posición de los sensores de temperatura.



**Gráfica 3.** Comportamiento de la variación de temperatura en el interior de la campana a distintos flujos de operación.

## CONCLUSIONES

- La implementación de los cojinetes de aire no generó gradientes de presión relativa significativos en el interior de la campana durante su desplazamiento.
- La resolución en la medición de volumen puede mejorarse al menos en una razón de 100:1 por la incorporación de la regla lineal en lugar del encoder rotatorio original.
- La contribución de incertidumbre asociada a la constante de calibración “K” debido a la resolución del encoder rotatorio se abatió en un orden del 30%, al incorporar el encoder lineal

- Una de las bondades que acarrea el rediseño del patrón nacional de flujo de gas al restringir su movimiento ascendente, es la trazabilidad del encoder lineal a la magnitud de longitud por medio de su calibración con un interferómetro.
- Los gradientes de temperatura máximos en el interior de la campana son del orden de 0,2 °C; lo que se traduce en una incertidumbre estándar del orden de 0,06 °C por este concepto.
- El volumen requerido para obtener condiciones estables de presión en el interior de la campana es proporcional a la rapidez de desplazamiento de la misma.
- Es indispensable investigar sobre las causas y posibles soluciones de la inestabilidad en la presión relativa en el interior de la campana al inicio de su desplazamiento.

## REFERENCIAS

- [1] EG&G, Certificado de calibración, probador tipo campana FTBP-10
- [2] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones.
- [3] H.V. Beck. September 1964. “Calibration of bell provers”, American Gas Association Monthly,