

TOBERA DE FLUJO CRÍTICO COMO PATRÓN DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES INDUSTRIALES TIPO CAMPANA

Juan C. Gervacio S.
Centro Nacional de Metrología
442 2 11 05 00 jgervaci@cenam.mx

Resumen: Las toberas de flujo crítico ofrecen un alto grado de repetibilidad, además de tener el reconocimiento de un dispositivo que mantiene su estado de calibración por largos períodos de tiempo, en los últimos años han sido utilizadas como patrones de transferencia para comparaciones internacionales entre Institutos Nacionales de Metrología y para la diseminación de la trazabilidad del caudal másico de gas por parte de estos institutos a laboratorios secundarios **y en lo que respecta a este artículo, la diseminación del volumen de gas a empresas distribuidoras de gas natural.**

En este artículo, se describe el empleo de las toberas de flujo crítico con diámetro de garganta de 0.787 mm a 1.118 mm en un alcance de (5 a 12) dm³/min como patrones de referencia, para la calibración de medidores de volumen de gas tipo campana instalados en la industria de distribución de gas a condiciones de presión entre (78 a 103) kPa. Así mismo, se hace una descripción del procedimiento de calibración, los requerimientos de instalación para lograr **el número de Reynolds (Re)** obtenido en la calibración de la tobera, las variables importantes a medir en el proceso de calibración del volumen de la campana como son: la presión, temperatura y tiempo, y una descripción del presupuesto en la estimación de incertidumbre del volumen.

1. INTRODUCCIÓN

Diversos principios y técnicas han sido empleados en un intento por perfeccionar una técnica de medición confiable, repetible y sencilla para la metrología de flujo másico de gas en conductos cerrados. Una de las alternativas para lograr tal exactitud en la medición del flujo, es la utilización de la tobera o venturi operando bajo condiciones de régimen crítico, es decir que el flujo alcance la velocidad del sonido en la garganta del dispositivo. La metrología mediante flujo crítico está orientada hacia las mediciones de gran exactitud, aunque también se puede utilizar para mediciones convencionales donde la exactitud requerida no es muy alta.

Hoy en día la medición exacta del volumen de gas juega un papel primordial en aplicaciones de compra-venta en el área de pequeño comercio y hogar. Siendo un punto importante para que la industria de distribución de gas natural haya incrementado su interés en invertir en el área de metrología, a través de la adquisición de patrones de trabajo del tipo campana u otro, así como la implantación de laboratorios internos para verificar los medidores de gas del tipo diafragma (cámara seca) que son instalados en el área comercio-hogar de las ciudades conforme a la norma oficial mexicana NOM-014-SCFI-2004.

Para asegurar que cada medidor de flujo de gas provee una medición confiable, el Centro Nacional de Metrología se responsabiliza en mantener, conducir y desarrollar procesos de medición, y diseminar la trazabilidad de medición de flujo de gas, tal es el caso, de este trabajo donde se describe el proceso de calibración de los medidores de volumen gas tipo campana instalados en los laboratorios de verificación de las empresas distribuidoras de gas natural ubicadas en México y en el extranjero.

2. PRINCIPIO DE MEDICIÓN

En estos dispositivos existe una correlación entre el caudal másico y la presión diferencial a través de la restricción. Si la velocidad del fluido en la zona de área mínima es inferior a la velocidad del sonido se les denomina “medidores subsónicos”; por el contrario, si la velocidad del fluido alcanza el valor de la velocidad sónica en la zona de área mínima (restricción) entonces al medidor se le conoce como “medidor sónico” o “medidor crítico”.

En el estado crítico o estado de “bloqueo” no se puede transmitir ningún efecto aguas arriba, que se presente en la sección de salida de la tobera. En consecuencia, cualquier reducción en la presión de salida por debajo de la presión crítica no afecta las

condiciones del flujo en la tobera. Así, un aspecto importante en las toberas sónicas es:

El caudal másico que circula a través de una tobera en régimen sónico es únicamente función de las propiedades de estancamiento, cuyos valores se estiman a partir de las mediciones de temperatura y presión estática aguas arriba de la tobera, así como de las dimensiones de la garganta de la tobera.

Estos dispositivos proveen una manera fiable y precisa de medir flujo de gas y juegan un importante rol en muchos procesos industriales. Al principio solamente se usaban en la industria aeroespacial, sin embargo ahora son usadas en las industrias del automotriz, química, biotecnología, militar, distribución y venta de hidrocarburo, teniendo numerosas aplicaciones como reguladores de presión, controladores de flujo másico, reductores de presión y **patrones de referencia en la medición de flujo de gas**.

En un esfuerzo por reducir la incertidumbre en la medición del flujo de gas y fomentar el uso de las toberas de flujo crítico para una diversidad de gases, se ha incrementado el interés por entender el comportamiento del flujo en estos dispositivos y un aspecto de particular importancia involucra el entendimiento de cómo el coeficiente de descarga es afectado por el comportamiento dinámico y termodinámico del gas, además de la geometría de la tobera. Es importante recalcar que el coeficiente de descarga C_d , contempla todas las desviaciones y/o irreversibilidades que sufre el campo de flujo a causa de su comportamiento multidimensional y su interacción en la región de capa límite.

2.1 Modelo matemático

La ecuación para estimar el caudal másico a través de una tobera de flujo crítico se obtiene aplicando las ecuaciones de continuidad, de conservación de cantidad de movimiento, de la primera y segunda ley de la termodinámica (asumiendo un proceso isentrópico unidimensional), y de las ecuaciones de estado y procesos correspondientes. En este artículo obviaremos la deducción de la ecuación matemática que relaciona las propiedades termodinámicas del fluido con el flujo másico que pasa a través de un medidor crítico, teniendo en mente que la deducción de dichas expresiones puede consultarse en la literatura [1]. El proceso de cálculo de caudal, uso y diseño de las toberas de flujo crítico se describe en la norma ISO 9300 [2].

La calibración de la tobera de flujo crítico consistió en determinar el valor del coeficiente de descarga (C_d); mismo que resume las diferencias entre el caudal másico teórico y el caudal másico real a través de la tobera, según se aprecia en la ecuación 1 versus número de Reynolds (Re). Las variables en el proceso de calibración de las toberas son la presión P_o y temperatura aguas arriba de la tobera T_o y el diámetro de la garganta d , y el caudal másico del patrón de referencia, \dot{m}_{patron} .

Los patrones empleados en la calibración de las toberas fueron el Patrón Nacional tipo Campana modelo FTBP-05 con capacidad de (30 a 840) dm^3/min y el Patrón Nacional tipo Pistón con capacidad de (0.05 a 43) dm^3/min .

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

Normalmente, el coeficiente de descarga determinado según la ecuación 1 no es una constante; esto es, depende de la rapidez de circulación del fluido y de las propiedades termodinámicas. Por esta razón, una estrategia para informar sobre los resultados de calibración de una tobera de flujo crítico es una relación funcional entre el coeficiente de descarga y el número adimensional **Reynolds Re** (ecuación 2), sin embargo, para este caso particular se fijo un valor de C_d y Re .

$$Re = \frac{4 \cdot q_{m_{tob}}}{\pi \cdot d_g \cdot \mu} \quad (2)$$

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

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

2.2 Calibración de las campanas

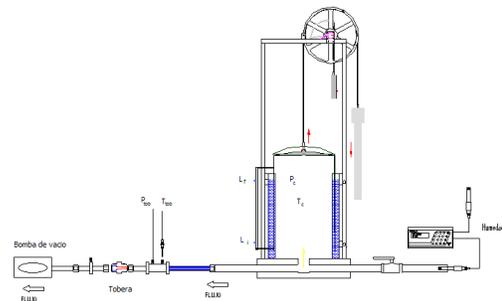
La calibración de la campana consiste en obtener el volumen que tiene la campana entre dos graduaciones: lectura inicial, L_i a lectura final, L_f de la escala lineal, aplicando el siguiente procedimiento:

- a. La tobera de flujo crítico (patrón de referencia) se instala aguas abajo de la

- campana (figura 1). Entre la tobera y la campana se debe colocar una válvula de aguja para alcanzar y/o ajustar el valor de número de Reynolds al valor reportado en la calibración de la tobera flujo crítico.
- b. Frente a la escala lineal de la campana se instala un sensor óptico conectado a un contador universal con el propósito de realizar la toma del tiempo. Se ajusta el sensor (por diferencia de colores) para iniciar la toma de tiempo en la graduación de L_i y que finalizara en la graduación de L_f . Cabe mencionar que en algunos medidores tipo campana por el tipo de diseño es complicado medir el tiempo con un contador universal-sensor óptico, para tales casos la medición se realiza aplicando un cronómetro.
 - c. Se instalan los sensores de presión y temperatura tanto en la campana como en la tobera de flujo crítico.
 - d. Aguas abajo de la tobera de flujo crítico se instala la bomba de vacío.
 - e. Completa la instalación de todos los instrumentos se debe realizar la prueba de fuga, para asegurar la hermeticidad del sistema campana-tobera. Se fija la campana en la graduación de L_i y cerrando la válvula instalada aguas abajo de la tobera, se deja transcurrir un tiempo de aproximadamente (1 a 2) h y después se revisa si hay desplazamiento.
 - f. Regularmente la instalación se realiza un día antes de realizar las pruebas y se dejan ambientar los elementos primarios por más de 15 h (depende de la capacidad del sistema de aire acondicionado del laboratorio).
 - g. Antes de iniciar las pruebas de calibración del volumen, se ambienta con aire todo el sistema por más de 30 min o hasta alcanzar el equilibrio térmico entre el medidor y patrón (**menor 0.3°C**). Se regula el valor de presión de entrada de la tobera para obtener el número de Reynolds indicado en el certificado de calibración de la tobera.

- h. Al inicio y final de las pruebas se toman los datos de humedad, temperatura y presión ambiente.
- i. Al momento de desplazar la campana hacia arriba, ligeramente por arriba de L_i , se debe tomar el valor de humedad, en todas las pruebas.
- j. Durante cada prueba se toman los valores de presión y temperatura en la tobera y en la campana, unos segundos después del inicio, mitad y segundos antes del final del volumen a medir.
- k. Se realizan aproximadamente 8 pruebas en la calibración con el patrón de referencia (tobera de flujo crítico) y de 4 a 6 pruebas con un segundo medidor que puede ser del tipo de cámara seca o una tobera, para validar los resultados de calibración.

Figura 1. Instalación de la tobera de flujo crítico para la calibración del volumen de la campana.



2.3 Cálculos

El método de calibración es por comparación directa, esto es, la masa de aire que pasa por el medidor debe ser igual a la masa de aire colectada en la campana, que es la aplicación de la ecuación de la conservación de la masa:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV + \int_A \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} \tag{4}$$

Aplicando la ecuación de continuidad a los medidores tipo toberas y campana, la ecuación anterior toma la forma de:

$$q_{m_{tob}} = \frac{\rho_c \cdot V_c}{\Delta t} \tag{5}$$

Sustituyendo la ecuación 3 en 5, el volumen de la campana a las condiciones de presión y temperatura durante la calibración se expresa de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{\Delta t \cdot q_{m_{tob}}}{\rho_c} = \frac{\Delta t \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_g^2 \cdot C^* \cdot Cd \cdot p_0}{4 \cdot \sqrt{\frac{R}{M_a \cdot \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]} \cdot T_0}} \right)}{\rho_c} \tag{6}$$

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

$$V_{20} = V_c \cdot [1 + 3 \cdot \alpha \cdot (20 - T_c)] \tag{7}$$

La nomenclatura empleada en este artículo tiene la siguiente descripción:

- Cd*: Coeficiente de descarga en la tobera
- C**: Función de flujo crítico
- d_g*/m: Diámetro de garganta de la tobera
- q_{m_{tob}}*/(kg/s): Caudal másico en la tobera
- M_a*/(kg/mol): Masa molar del aire seco
- M_v*/(kg/mol): Masa molar del agua
- p₀*/Pa: Presión de estancamiento
- R*/(J/mol/K): Constante universal de los gases
- Re*: Número de Reynolds
- T₀*/K: Temperatura de estancamiento
- T_c*/°C: Temperatura del aire en la campana
- V_c*/L: Volumen de la campana a condiciones de calibración

- V₂₀*/L: Volumen de la campana a temperatura de 20 °C
- x_v*: Fracción molar del vapor de agua
- α*/(1/°C): Coeficiente lineal de expansión térmica del material de la campana
- ρ_a*/(kg/m³): Densidad del aire a las condiciones de presión y temperatura de la campana
- Δt*/s: Tiempo invertido en el volumen calibrado

3. RESULTADOS

El resultado de la calibración se traduce en la obtención de un valor de volumen a 20 °C (*V₂₀*) que corresponde a una graduación en la escala del medidor tipo campana. Este volumen relaciona las variables de *p₀*, *T₀*, *h*, *Cd*, *C**, *d_g*, *R* y *ρ_{camp}*.

Se presentan los resultados de 3 diferentes distribuidoras de gas.

		<i>V₂₀</i> /L	
<i>Lectura en la campana</i> /L		<i>Lectura final</i> /L	<i>U(V₂₀)</i> %
		300	
<i>Lectura inicial</i> /L	200	100.06	0.32

Tabla 1. Resultado de calibración del medidor de gas tipo campana marca SAMGAS, modelo 500 dm³.



Figura 2. Foto de instalación de la tobera de flujo crítico para la calibración del volumen de la campana SAMGAS, modelo 500 dm³.



Figura 3. Foto de instalación de la tobera de flujo crítico para la calibración del volumen de la campana American Meter, modelo 110 L.

Lectura en la campana/L		V ₂₀ /L		U(V ₂₀)/%
		Lectura final/L		
		50	100	
Lectura inicial/L	0	50.13	100.34	0.4
	50		50.21	

Tabla 2. Resultado de calibración del medidor de gas tipo campana marca American Meter, modelo 110 L.

Lectura en la campana/L		V ₂₀ /L		U(V ₂₀)/%
		Lectura final/L		
		50		
Lectura inicial/L	0	49.77		0.40

Tabla 3. Resultado de calibración del medidor de gas tipo campana marca Rockwell, modelo 5ft.



Figura 4. Foto de instalación de la tobera de flujo crítico para la calibración del volumen de la campana Rockwell, modelo 5 ft³.

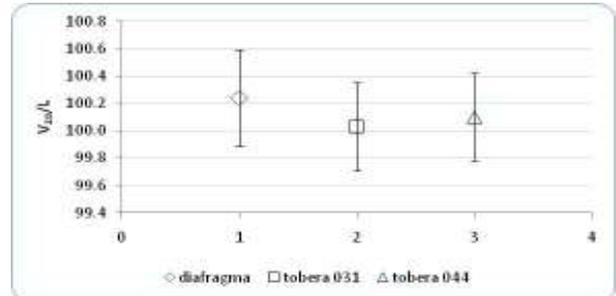


Figura 5 Resultado del aseguramiento de la calidad de las mediciones del volumen de la campana SAMGAS, modelo 500 dm³

Figura 5. .

Las pruebas de evaluación de la calidad, se realizan después de finalizar la calibración del volumen de la campana. Se instala el medidor de cámara seca o tobera (Figura 6), se realiza la prueba de hermeticidad y se ambienta durante un tiempo de al menos 1 h o hasta alcanzar el equilibrio térmico entre los dos medidores (menor de 0.3 °C) y posteriormente se realizan las pruebas.

4. VALIDACION DE RESULTADOS

Un aspecto importante en la calibración de cualquier magnitud, es el aseguramiento de la calidad de los resultados de las mediciones obtenidas. El laboratorio de flujo de gas ha implementado un mecanismo de validación de las mediciones; a través de la evaluación de los resultados de las mediciones, usando un patrón alternativo que bien puede ser una tobera de flujo crítico o un medidor de cámara seca (diafragma) de alta exactitud. En la figura 5 se muestra en forma grafica, la evaluación de los resultados de la calibración del volumen de la campana SAMGAS modelo 500 dm³; obtenidos con diferentes patrones.



Figura 6. Foto de la evaluación del volumen de la campana SAMGAS, modelo 500 dm³, usando el medidor tipo diafragma.

5. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS DE CALIBRACION.

Inicialmente existían dos técnicas genéricas para la obtención del volumen; la primera, conocida como de desplazamiento de agua, 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.

La calibración del volumen en estas campanas aplicando la técnica dimensional consiste en determinar el diámetro interno promedio de la campana, para ello se hace uso de una cinta especial (conocida como π tape), de cuya escala de medición se obtiene directamente el diámetro externo. Alternativamente, el diámetro interior de la campana puede medirse usando una máquina de medición por coordenadas de tamaño conveniente [3] y por desplazamiento de aceite [4] se puede realizar 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

La técnica de comparación directa usando las toberas de flujo crítico es la aplicación de la conservación de la masa y la ecuación de continuidad y se logra la trazabilidad a los Patrones Nacionales de Flujo de Gas.

Los resultados hasta ahora obtenidos con estas dos técnicas independientes son equivalentes dentro de la incertidumbre declarada y se observa en la Figura 7. La calibración de las campanas por métodos independientes proporciona la ventaja de permitir el uso de modelos matemáticos (validados internacionalmente) de cuya aplicación se obtienen mejores valores del volumen calibrado y de su incertidumbre. De esta manera se van obteniendo otros caminos que nos permiten disminuir los valores de incertidumbre aplicados a estos sistemas de medición.

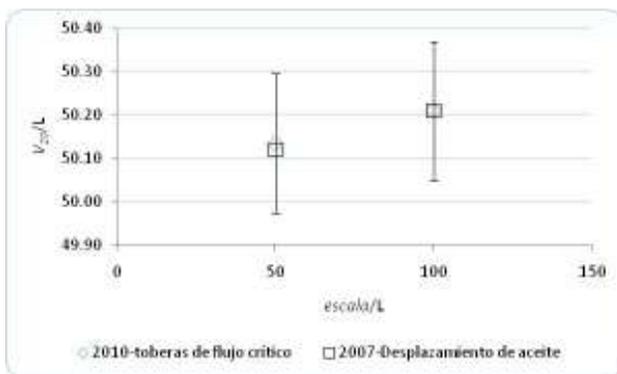


Figura 7. Resultados de la calibración de la campana American meter, modelo 110 L, aplicando diferentes técnicas.

6. INCERTIDUMBRE

Para la obtención del valor de incertidumbre del Volumen a 20°C (V_{20}), se aplicó la ecuación No. 7, y el proceso de cálculo fue conforme al documento: “JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of the uncertainty in measurement”, GUM 1995 with minor corrections [5].

El valor de incertidumbre expandida de la medición se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k=2$, que asegura un nivel de confianza de aproximadamente 95%. El proceso de cálculo de la incertidumbre de medición se consideran las incertidumbres tipo A y B [5] de cada una de las variables que intervienen en el modelo matemático No. 7 y cuyos valores se describen en la tabla no. 4. Realizándose bajo las siguientes consideraciones:

1. Las variables de entrada se asumen mutuamente independientes.
2. La incertidumbre del volumen de la campana es el resultado de la combinación de:
 - a) La incertidumbre de calibración de la tobera, sensores de presión, temperatura y humedad.
 - b) La incertidumbre del tiempo es el resultado de la combinación de la incertidumbre de calibración del contador universal y/o cronometro, y la desviación estándar de las mediciones de tiempo.
 - c) La incertidumbre de la escala de la campana es el resultado de la resolución (ancho de la marca en la escala).
 - d) La desviación estándar del volumen de las pruebas realizadas (repetibilidad).

7. CONCLUSIONES

- La calibración de las campanas en las empresas distribuidoras de gas ha sido realizada de forma exitosa mediante el método de comparación, usando como referencia toberas de flujo critico a valores de caudal de (5 y 12) L/min.
- Los resultados obtenidos por este método y el de desplazamiento de aceite empleado anteriormente tienen diferencias menores de 0.1%

- El resultado de medición del volumen de las campanas obtenidas son trazables al Patrón Nacional de Flujo de Gas.
- El resultado en la medición del volumen de la campana tiene mejor repetibilidad y reproducibilidad; si las condiciones de equilibrio térmico en el laboratorio se mantiene en un valor menor de 0.5°C, durante toda la prueba.

Presupuesto de incertidumbre del Volumen de la campana										
	Variables	valor	unidad	incertidumbre original	tipo	inc. standar, u(x)	coeficiente de sensibilidad	contribucion/ L	cuadrados	contribucion/ %
1	Temperatura de la tobera	20.73	K	0.300	B, N	0.300	-0.189890	-5.70E-02	3.25E-03	13.0
2	Presión de la tobera	80500.00	Pa	49.432	B, N	49.432	0.001247	6.16E-02	3.80E-03	15.1
3	Humedad	55.09	%	1.947	B, N	1.947	0.003411	6.64E-03	4.41E-05	0.2
4	tiempo	1387.24	s	2.887E-04	B, N	2.887E-04	0.072107	2.08E-05	4.33E-10	0.0
5	Cd, tobera	0.95	adim	0.002	B, N	0.001	105.696969	7.50E-02	5.63E-03	22.4
6	C*	0.69	adim	1.781E-04	B, N	8.906E-05	146.011859	1.30E-02	1.69E-04	0.7
7	Presión de la campana	102653.38	Pa	58.039	B, N	58.039	-0.000980	-5.69E-02	3.23E-03	12.9
8	Temperatura de la campana	21.08	K	0.097	B, N	0.097	0.371721	3.23E-02	1.04E-03	4.1
9	Ecuación de la densidad	0.00	kg/m ³	9.500E-08	B, N	4.750E-08	-82.694458	-3.93E-06	1.54E-11	0.0
10	Lectura campana	0.00	L	0.200	B, R	0.066	0.999995	5.77E-02	3.33E-03	13.3
11	coeficiente de expansión termica del material de la campana	0.00	1/°C	5.00E-06	B, R	1.44E-06	-107.658545	-1.56E-04	2.41E-08	0.0
12	Corrección por aceite adherido	0.00	L	0.040	B, N	0.040	0.999995	4.00E-02	1.60E-03	6.4
13	repetibilidad	0.00	L	0.055	A, N	0.055	1.000000	5.45E-02	2.98E-03	11.9
	Volumen	100.03	L						2.51E-02	
								U _c (V ₂₀)/L	0.158	
								U(V ₂₀)/L	0.317	
								U(V ₂₀)/%	0.32	

Tabla 4. Presupuesto de incertidumbre en la medición del volumen de la campana, V₂₀, usando como referencias las toberas de flujo critico.

AGRADECIMIENTOS

- A Manuel Maldonado por su participación en los servicios de calibración “in situ”, realizados a las campanas de las empresas distribuidoras de gas natural.
- A Roberto Arias Romero, por sus comentarios valiosos en la mejora continua, de los procesos de calibración.

REFERENCIAS

[1] Çengel A. Y., Boles A. M., “Thermodynamics An engineering approach”, , Mc Graw Hill, Second edition, 1994

[2] ISO/SD 9300, “Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, July 2002.

[3] Aschenbrenner A., Brunnemann H., Die Gasmessgloke –ein Basisnormalgerät zur Darstellung der Volumeneinheit für Gase, PTB-Bericht, 1984.

- [4] José M. Maldonado R., Juan Carlos Gervacio S., “Calibración Del Patrón Nacional de Flujo de Gas por el Método de Desplazamiento”, simposio de metrología 2004.
- [5] JCGM 100:2008,GUM 1995 with minor corrections “Evaluation of measurement data — Guide to the expression of the uncertainty in measurement”, September 2008.