

DISEÑO Y CARACTERIZACION DE UN BANCO DE TOBERAS TIPO VENTURI EN REGIMEN CRITICO

Roberto Arias R., Juan C. Gervacio S.
Centro Nacional de Metrología
rarias@cenam.mx; jgervaci@cenam.mx;

Resumen: Se describe el diseño, fabricación y caracterización de un sistema de medición de caudal de gas, que consiste de un arreglo de toberas tipo Venturi en régimen crítico con un alcance de medición hasta 1 850 L/min. El diseño permite utilizar en paralelo hasta 6 diferentes toberas, estrategia que facilita el establecimiento de diferentes caudales en la calibración de medidores de caudal de gas. Así mismo, este diseño posee la cualidad de permitir la operación de las toberas en los modos de presión positiva y de succión, con la finalidad de maximizar las posibilidades de calibración al usar este sistema como patrón de trabajo. Se plantea el marco teórico del diseño de las partes que forman el banco de toberas, detalles de construcción y montaje, tomando como referencia la norma ISO 9300, y a la experiencia y conocimiento adquiridos en diferentes Institutos Nacionales de Metrología. Se incluyen los resultados de calibración de las toberas en modo individual y un arreglo combinatorio.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de servicios de calibración de medidores de caudal de gas, tanto a nivel nacional como internacional pone de manifiesto la necesidad de disponer de sistemas de referencia adecuados para resolver las necesidades de calibración de los sectores industrial, de servicios, de investigación, entre otros.

Los métodos primarios para medir caudal de fluidos por definición deben ser capaces de realizar una medición sin necesidad de ser referidos a cualquier otro dispositivo de medición de caudal. Los métodos secundarios en contraparte, sí requieren de dicha referencia (llámese calibración). La exactitud en cualquier medición depende de la exactitud del patrón primario, y de la forma en la cual esta exactitud es diseminada a través de los patrones de transferencia. Es de esperarse que en cada eslabón de la **cadena de trazabilidad** se pierda cierto nivel de exactitud. Por lo tanto, siempre será recomendable el menor número de transferencias (eslabones en la cadena de trazabilidad).

Es entonces recomendable que se disponga de patrones primarios de alta exactitud y de patrones secundarios con los cuales la pérdida de exactitud en el proceso de calibración no sea significativa. En la comunidad internacional de metrología de flujo de fluidos se ha realizado una gran cantidad de trabajo al respecto. Casi de manera generalizada se ha reconocido que las toberas operando en régimen crítico poseen características muy favorables para funcionar como patrón secundario confiable. En

CENAM, las toberas se han utilizado hasta el momento como *patrones de control* para asegurar el desempeño metrológico de los Patrones Nacionales de Medición de Caudal de Gas. La reproducibilidad de las toberas de flujo crítico a lo largo de 7 años de uso en el CENAM se mantiene en el orden de 0,1%.

Particularmente, el objetivo del diseño y construcción del banco de toberas de flujo crítico es dar respuesta a la demanda de servicios de calibración a la industria, y disminuir la carga de trabajo de los patrones nacionales. Dentro de los principales tipos de instrumentos de medición que podrán calibrarse con el banco de toberas se encuentran: medidores de área variable (rotámetros), turbinas, de diafragma, rotativos, de flujo laminar, entre otros.

El banco de toberas en régimen crítico es un sistema semi-fijo de medición de caudal de gas formado por 6 toberas tipo Venturi con sección de entrada toroidal [1], instaladas en paralelo dentro de una cámara de de entrada (ver figura 1). La cámara esta construida de acero inoxidable, y es un cilindro de diámetro de 235 mm por 645 mm de longitud; en uno de sus extremos se suelda una brida de diámetro de 235 mm con un maquinado especial donde se acoplan las toberas. En la cámara de entrada se sitúan los sensores de presión y temperatura, cuyos resultados de medición son usados para estimar las propiedades de estancamiento. La cámara de salida, cuyo diámetro interno es 235 mm, recibe el fluido procedente de la sección de control de caudal.



Fig.1 Fotografía del banco de toberas de flujo crítico. Dirección de flujo de derecha a izquierda.

En cada una de las 6 líneas de flujo se encuentran montadas dos válvulas instaladas en serie, con el propósito de seleccionar las toberas de acuerdo con los requisitos de caudal correspondientes, y para asegurar la hermeticidad del sistema. En las dos cámaras como en las líneas de flujo existen sensores de presión y temperatura que servirán para: conocer las propiedades termodinámicas del fluido, corroborar el régimen de flujo, y por consecuencia para calcular el caudal másico a través de cada una de las toberas. El banco de toberas cuenta con un arreglo de reguladores de presión y caudal que facilitarán la repetibilidad en el control de caudal.

PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Los medidores de flujo del tipo de presión diferencial basan su funcionamiento en las pérdidas de presión que ocurren al pasar el fluido a través de una restricción. En los equipos de este tipo (i.e. placas de orificio, tubos Venturi, o toberas) 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 también conocido como 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, dos aspectos importantes en las toberas sónicas son:

1. El caudal másico que circula a través de una tobera en régimen sónico es únicamente función de las propiedades de estancamiento, y 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.
2. Las toberas actúan como controladores de caudal, creando condiciones estables aguas arriba de la tobera, aunque las condiciones aguas abajo no lo sean.

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 isoentrópico unidimensional), y de las ecuaciones de estado y proceso 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 [2].

El coeficiente de descarga (que se interpreta como un factor de corrección) y el número de Reynolds se usa para describir la curva de calibración de una tobera de flujo crítico. El proceso de cálculo de caudal se describe en la norma ISO 9300 [1]. Las variables en el proceso de calibración de las toberas son la presión y temperatura aguas arriba de la tobera T y P , el diámetro de la garganta d , y el caudal másico del patrón de referencia, $\dot{m}_{patron}$. La calibración de una tobera de flujo crítico consiste en determinar el valor del coeficiente de descarga; 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 siguiente ecuación,

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{teorico}} = \frac{\dot{m}_{patron}}{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2 \cdot C^* \cdot P_0}{\sqrt{\left(\frac{R_u}{M}\right) T_0}}} \quad (1)$$

donde, $\dot{m}_{patron}$ representa el valor de caudal másico realizado por el patrón de referencia en cuestión; P_0 y T_0 corresponden a la presión y temperatura de estancamiento, C^* es la constante conocida como crítica y cuyo valor depende de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo, R_u es la constante universal de los gases [1] y M es la masa molar del gas [1]. De la termodinámica puede demostrarse que P_0 y T_0 pueden calcularse con las siguientes expresiones

$$T_0 = T \left[1 + \left(\frac{\kappa - 1}{2} \right) Ma^2 \right] \quad (2)$$

$$P_0 = P \left[1 + \left(\frac{\kappa - 1}{2} \right) Ma^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3)$$

en las ecuaciones anteriores, κ representa la relación de calores específicos ($\kappa = C_p/C_v$) del fluido de trabajo; Wright [4] propone el siguiente modelo para su determinación,

$$\kappa = 1,39263 + 7,915 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1,822 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + \left(\frac{20,2}{T} \right)^{2,36} \cdot \left(\frac{P}{101,325} \right)^{1,015} \quad (4)$$

En las ecuaciones 2 y 3 se aprecia la significancia del número de Mach Ma , respecto de la relación P/P_0 y T/T_0 . Cuanto mayor sea el número de Mach en la sección donde se encuentran instalados los sensores de temperatura y presión, mayor serán los cocientes P/P_0 y T/T_0 , lo cual puede interpretarse como una "lejanía" respecto de las condiciones de estancamiento. Específicamente, la sección transversal donde se ubican los sensores de presión y temperaturas en el banco de toberas tiene un diámetro interior de 235 mm, que comparado con el diámetro de garganta de las toberas, es tan grande (relación 1:50) que las condiciones aguas arriba de las toberas pueden sin problema alguno considerarse como de estancamiento.

el valor de C^* , mejor conocida como constante crítica puede obtenerse de la norma ISO 9300, para diferentes valores de presión y temperatura absolutas.

Una vez que las toberas han sido calibradas en forma individual, entonces el caudal másico a través de una tobera se calcula de acuerdo con la siguiente expresión

$$\dot{m} = \frac{\pi \cdot C_d \cdot d^2 \cdot C^* \cdot P_0}{4 \sqrt{\left(\frac{R_u}{M} \right) T_0}} \quad (5)$$

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_d , (ver figura 2)

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d \cdot \mu} \quad (6)$$

donde d es el diámetro de la garganta, y μ la viscosidad dinámica.

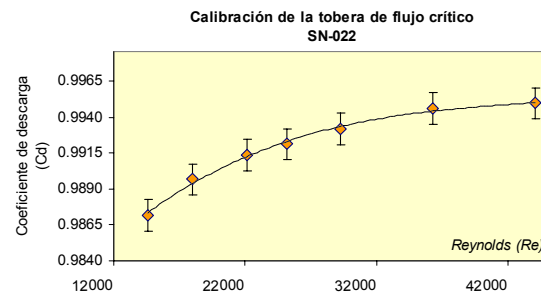


Fig. 2 Curva de calibración de una tobera de flujo crítico ($C_d - Re_d$)

DISEÑO DEL BANCO DE TOBERAS DE FLUJO CRÍTICO

El diseño, construcción e instalación del banco de toberas se realizó en base a los requerimientos que marca la norma ISO 9300, las recomendaciones de otros laboratorios de prestigio, así como en la teoría de análisis dimensional y semejanza.

Para la obtención del diámetro de la línea central en la cámara o depósito donde se ubican las toberas se realizaron algunas consideraciones especiales, principalmente basados en el uso de los parámetros adimensionales, tales como el número de Reynolds

Re , el número de Mach Ma , y la relación de diámetros β , ($=d/D$).

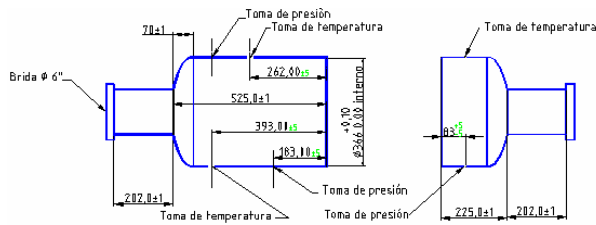


Fig. 3 Diseño de las cámaras que forman el banco de toberas. La dirección de flujo de izquierda a derecha.

Sistema de control de las líneas de flujo

En cada una de las 6 líneas de flujo existen dos válvulas electro-neumáticas que sirven para seleccionar la(s) tobera(s) a emplear, en función del caudal solicitado en la calibración. Las válvulas se podrán seleccionar y operar de forma manual y automática desde un panel de control electrónico instalado en uno de los lados de la mesa-soporte

El diseño del control de actuación de las válvulas consiste en un circuito eléctrico en paralelo para alimentar cada una de los solenoides de las válvulas, por medio de las cuales se energizan los actuadores que proporcionan el torque necesario para la apertura/cierre de las válvulas. El control se lleva a cabo mediante selectores de dos posiciones (On-Off), que actúan como mecanismos de corte eléctrico. El sistema neumático opera con aire a una presión entre 200 kPa y 275 kPa.

La presión a la entrada del banco se controla mediante un juego de reguladores de alta sensibilidad instalados en serie aguas arriba de la sección de entrada.

Calibración de las toberas

La calibración de las toberas de flujo crítico se refiere principalmente a la determinación del coeficiente de descarga a diferentes números de Reynolds. Los métodos primarios para llevar a cabo la calibración de las toberas son: a) gravimétrico, b) volumétrico o c) de razón de cambio (sistemas PVTt). En el CENAM se aplica el método volumétrico, usando dos patrones de referencia del tipo de desplazamiento positivo. Para alcances de

medición que se encuentren entre 0,05 L/min y 50 L/min se emplea un sistema primario conocido como "probador de pistón", estos valores se alcanzan empleando dos cilindros de vidrio con volumen aproximados de 0,5 L y 7 L respectivamente. Mientras que los valores de caudal entre 50 L/min hasta 2 500 L/min se alcanzan empleando dos patrones tipo campana con volumen aproximado de 140 L y 550 L.

Tanto el patrón nacional de caudal de gas tipo pistón (PNFGP) como la campana (PNFGC) son equipos que operan bajo el principio de desplazamiento positivo. Su funcionamiento se basa en la determinación simultánea del volumen de aire desplazado por el pistón o campana y el tiempo en el cual se realiza dicho desplazamiento de volumen para obtener el caudal volumétrico. Así mismo, se realizan mediciones de la presión, temperatura y humedad del fluido para determinar la densidad, viscosidad y finalmente el caudal másico. En la figura 4 se muestra un esquema de la instalación del banco de toberas cuando son calibradas contra el patrón nacional tipo campana.

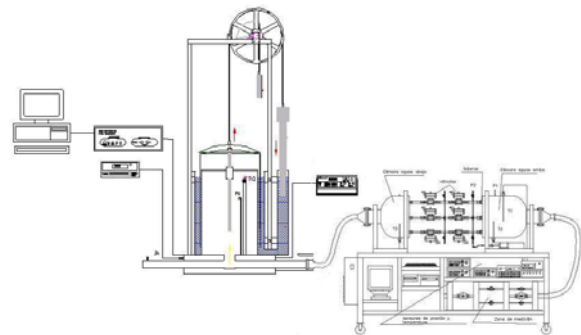


Fig. 4 Instalación del banco de toberas contra el PNFGC

Resultados de calibración de las toberas

El resultado de una calibración es la determinación del coeficiente de descarga en función del caudal másico que pasa a través de las toberas y que se colecta en los patrones de referencia tipo pistón o campana. Las toberas deben ser calibradas en forma individual primero, y después con propósitos de validación se calibran algunas combinaciones entre las seis toberas. Por cuestiones de espacio, en esa sección sólo se presentarán los resultados de dos de las seis toberas (SN044 y SN022), calibradas individualmente y en conjunto. En la figura 2 se muestran los resultados de calibración para la tobera SN022 en forma individual, mientras

que en la figura 5 se muestra el factor de corrección que tendría que aplicarse cuando se usaran las toberas SN044 y SN022 en forma simultánea. Idealmente, este factor de corrección tendría que ser igual a uno, independientemente del número de Reynolds.

$\dot{m}$ g/s	T °C	P kPa	error %
0,570 8	20,21	201,0	0,11
0,856 4	20,24	300,1	0,01
1,1472	20,3	400,8	-0,04
1,4350	20,32	500,6	0,00
1,7306	20,35	604,0	0,09

Tabla 1 Resultados de calibración de las toberas SN022 y SN044 (funcionando en paralelo), contra el Patrón Nacional tipo Campana.

variable		$u(x_i)$	c_i	%
T_0	°C	0.055	0.0016862	3.5
P_0	Pa	54	-4.89E-06	28.4
C^*	[]	0.00009	-1.432063	6.8
P_p	Pa	11.000	1.199E-05	7.1
T_p	°C	0.051	-0.003368	12.0
HR	%	1.443	-6.78E-07	0.0
K	p/L	1.366	-7.26E-05	4.0
N	pulsos	2.000	1.736E-05	0.5
t	s	0.001	-0.029837	0.4
rho	kg/m3	0.000	997.60246	0.9
repet		0.0003	0.9967385	36.4
		$u_c^2(C_d)$	2.456E-07	
		$u_c(C_d)$	0.0004956	
		$U(C_d)$	0.0009912	0,11%

Tabla 2 Presupuesto de incertidumbre para calibración de una tobera de flujo crítico

En la tabla 2 se aprecia que la mayor contribución a la incertidumbre en la calibración de una tobera de flujo crítico proviene de la repetibilidad y la reproducibilidad del proceso de calibración. La presión de estancamiento P_0 , contribuye también en gran medida a la incertidumbre de C_d ; aún cuando no se muestra en esta tabla, la dificultad en el control de presión a la entrada de la tobera es la

“culpable” de esta contribución tan importante. La incertidumbre expandida se informa con un factor de cobertura $k=2$ para definir un intervalo de confianza alrededor de la mejor estimación del mensurado del orden de 95%.

La incertidumbre de medición de caudal másico empleando toberas de flujo crítico tendrá en la incertidumbre del coeficiente de descarga su mayor contribución, seguida de la presión y temperatura de estancamiento, respectivamente

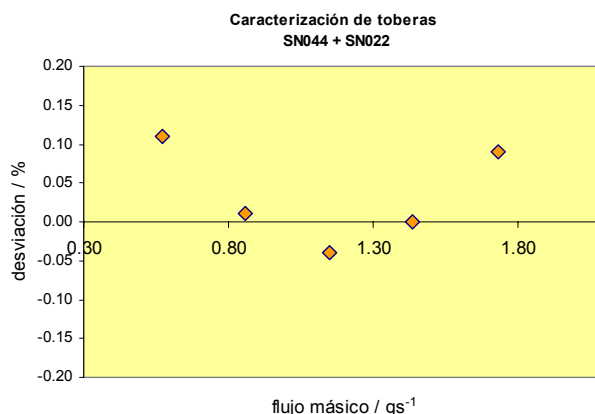


Fig. 5 Resultados de calibración de las toberas SN022 y SN044 (funcionando en paralelo), contra el Patrón Nacional tipo Campana

DISCUSION

La calibración conjunta de las toberas SN022 y SN044, contra el Patrón Nacional de Caudal de Gas tipo Campana exhibe resultados satisfactorios. Sin embargo, de acuerdo los resultados obtenidos para las presiones de operación de 200 y 600 kPa (ver tabla 1), éstos no han sido del todo satisfactorios, y requieren de un análisis detallado. En principio, se supone que en las mediciones realizadas a 200 kPa la condición crítica (o de bloqueo) no ha sido alcanzada en las dos toberas. Mientras que las mediciones a 600 kPa requieren de mejores mecanismos de control de la presión y la temperatura, respectivamente.

Las mediciones realizadas desde (300 – 500) kPa, los resultados son por demás satisfactorios, si tomamos en cuenta que la incertidumbre de medición de las toberas es del orden de 0,15% ($k=2$) y la máxima diferencia entre el patrón de referencia y el banco de toberas es menor que 0,05% respecto del valor de flujo másico.

CONCLUSIONES:

- El banco de toberas de flujo crítico ha sido construido de acuerdo con los requisitos establecidos en ISO 9300. La caracterización de las toberas (seis) en forma individual ha concluido satisfactoriamente. La correlación entre el coeficiente de descarga y el número de Reynolds indica, de cierto modo, que la manufactura de las toberas se realizó en apego a las indicaciones de la norma.
- La caracterización del banco de toberas, en modo de presión, está en proceso. Los resultados hasta ahora obtenidos indican que las toberas podrán emplearse en un alcance de presión de (300 – 600) kPa, con valores de incertidumbre menores que 0,15% ($k=2$).
- Los medidores de caudal de gas que podrán ser calibrados usando el banco de toberas de flujo crítico incluyen: medidores tipo diafragma, rotámetros, de flujo laminar, entre otros; disponiendo de una amplia gama de posibilidades en términos de los caudales que pueden lograrse mediante el banco de toberas.
- El banco de toberas podrá ser utilizado como patrón viajero para realizar servicios de calibración en campo.

REFERENCIAS

- [1] ISO 9300 (Draft 2002), "*Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles*", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [2] Çengel A. Y., Boles A. M., "*Thermodynamics An engineering approach*", , Mc Graw Hill, Second edition, 1994
- [3] Baker C. R., "*Flow measurement handbook - Industrial designs, operating principles, performance and applications-*", Cambridge University Press, 2000
- [4] White M. F., "*Fluid Mechanics*", Mc Graw Hill, USA, 1997
- [5] Wrigth D. J., "*The long term calibration stability of critical flow nozzles and laminar flowmeters*", NCSL 1998.
- [6] Wend G., Jarosch B., "*Bancos de pruebas con toberas de flujo crítico para aire*", Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Alemania, 1997.