



Calibración de toberas de flujo crítico por método volumétrico C_d

Calibration of critical flow nozzles by volumetric method C_d

Jesús Eduardo Rivera López , Alejandro Díaz Martínez , Pedro Alejandro Tamayo Mesa, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes , Gabriela Esmeralda Orozco Durán, José Luis Arciniega Martínez 

Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco (ESIME. UP), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) Zacatenco

Autor de correspondencia: Alejandro Díaz Martínez, Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco (ESIME. UP), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) Zacatenco. E-mail: adiazm1804@alumno.ipn.mx. ORCID: 0000-0002-3783-8056.

Recibido: 10 de Julio del 2021

Aceptado: 15 de Agosto del 2021

Publicado: 30 de Septiembre del 2021

Resumen. - En el presente trabajo, se tiene por objetivo mejorar la medición de flujo de gases por medio del uso de toberas de flujo crítico (Critical Flow Venturi Nozzles), para ello, se describe el procedimiento de calibración de dos toberas de flujo crítico con diámetros en la garganta de 0.022 y 0.088 pulgadas. El procedimiento desarrollado tiene como base las recomendaciones que hace la Norma ISO 9300 para la estimación y cálculo del coeficiente de descarga “ C_d ” de las toberas de flujo crítico. La calibración se realizó en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) con el uso de los patrones nacionales de flujo de gas. Los patrones utilizados o probadores son del tipo: Pistón y Campana, con un rango de medición de 0.05 a 50 L/min, y de 50 a 2840 L/min, respectivamente. El método utilizado para la calibración de las toberas fue mediante la comparación directa con el patrón.

Palabras clave. - Flujo crítico; Calibración; Microtobera; Estimación de la incertidumbre; Patrones.

Abstract. - In the present work, the objective is to improve the measurement of gas flow through the use of critical flow nozzles (Critical Flow Venturi Nozzles), for this, the calibration procedure of two critical flow nozzles with diameters in the throat of 0.022 and 0.088 inches. The procedure developed is based on the recommendations made by the ISO 9300 Standard for the estimation and calculation of the discharge coefficient "Cd" of the critical flow nozzles. The calibration was carried out at the National Metrology Center (CENAM) with the use of national gas flow standards. The standards used or testers are of the type: Piston and Bell, with a measurement range of 0.05 to 50 L / min, and from 50 to 2840 L / min, respectively. The method used to calibrate the nozzles was by direct comparison with the standard.

Keywords. – Critical flow; Calibration; Micro nozzle; Estimation of uncertainty; Standards.



1.- Introducción

Gases como el hidrógeno, helio, metano, gas natural y otros, juegan un importante papel en la sustitución de los hidrocarburos, los cuales al ser recursos energéticos fósiles se consideran no renovables y están sujetos al agotamiento, para determinar esto se utiliza el indicador de agotamiento de las reservas de hidrocarburos, conocido técnicamente como el *coeficiente de reservas totales-producción* [1], cuyo propósito es medir el número de años que podrían rendir las reservas de hidrocarburos estimadas de un país de acuerdo al nivel de explotación de un año dado. Además, el gas natural resulta el combustible más económico en términos de energía entregada en la caldera, lo que implica que el costo de generación de vapor, donde el combustible incide más del 80% se reduce utilizando gas [1].

El gas natural produce una mejor combustión, gracias a que, al estar en estado molecular, sus componentes reaccionan de forma más completa con las moléculas de oxígeno. Se produce una combustión más eficiente porque requiere menos exceso de aire en el quemador, lo que, a su vez, produce menos CO_2 y otras partículas contaminantes. Lo anterior sucede debido a que los quemadores de gas natural no requieren de vapor, como sí lo requieren los combustibles líquidos y esto no solo reduce el costo de la demanda de vapor o electricidad para comprimir el aire, sino que resulta en una ventaja para el cumplimiento de normas sobre los límites máximos permisibles de emisiones de gas invernadero y partículas en suspensión en el ambiente.

Tenemos el ejemplo de la Comisión Federal de Electricidad en donde a través de la reforma energética espera disminuir en un 90% el uso de hidrocarburos mediante el impulso del uso del gas natural en centrales de generación donde

establecen también que es tres veces más barato y 68% menos contaminante [2].

Por esta razón, la medición de flujo de gases está cobrando gran relevancia a nivel mundial, ya que hoy en día, se pierden millones de dólares por incertidumbre en la medición de flujo de gases con dispositivos subsónicos ($Ma \leq 0,3$) [3]. Los instrumentos subsónicos que suelen utilizarse para la medición de gases son el tubo Venturi, rotámetro, molinete, placa de orificio, etc.

Estos dispositivos cuentan con un rango de incertidumbre de 0,3 al 3% [4], con esta incertidumbre, se tiene una baja calidad en la medición. Por esta razón, laboratorios de metrología como el NIST (E.U), PTB (Alemania), KRISS (Corea), INMETRO (Brasil), CENAM (México), etc., han desarrollado investigaciones en elementos de medición de flujo crítico ($Ma= 1$). Estos medidores son conocidos como toberas y micro toberas (critical flow nozzles), donde el rango de incertidumbre de estos dispositivos oscila entre el 0,03 y 0,3% [4]. Existe una ventaja notable de los medidores de flujo crítico sobre los medidores subsónicos los cual los hace ser elementos óptimos en la medición de flujo de gas, así como también pueden ser utilizados como patrón secundario en la calibración de medidores subsónicos.

Existen dos maneras principales para calibrar toberas de flujo crítico, una de ellas es por medio de modelos numéricos, estos se componen de ecuaciones que se expresan como ecuaciones diferenciales parciales a las cuales describen la evolución futura de las diferentes variables relevantes en función de los valores de las distintas variables en el presente. En el caso particular de la NORMA ISO 9300 y su modelo numérico, el coeficiente de descarga C_d el cual depende principalmente de la forma de la tobera



de flujo crítico y del régimen de flujo, se determina mediante la siguiente ecuación $C_d = a - bRe^{-n}$, donde los coeficientes a, b y n para el caso de una garganta de tipo toroidal en la tobera tienen los siguientes valores $a = 0,9959$, $b = 2,720$ y $n = +0,5$, con un intervalo del régimen de flujo $2,1 \times 10^4 \leq Re \leq 3,2 \times 10^7$ [5], en esta ecuación la incertidumbre representa un 0,3% en un nivel de confianza del 95% para la tobera con garganta de tipo toroidal.

Algunos métodos de calibración indirectos se basan en la ecuación de estado $\rho = P/RT$, donde la masa es $m = \rho V$ y ρ es la densidad y V es el volumen de la sustancia respectivamente. Para ambos métodos se hace la suposición de que se conoce el volumen del recipiente que recogerá el gas [6].

Otra forma de calibrar es la experimental, en la cual existen diferentes técnicas de calibración como son las del tipo gravimétrico, volumétrico y los del tipo presión-volumen-temperatura-tiempo (PVT-t). Las condiciones establecidas para realizar estas pruebas incluyen el aire a presión atmosférica y temperatura ambiente. Los medidores del tipo volumétrico incluyen un pistón o campana de calibración. La calibración volumétrica consiste en comparar la medida de un patrón de referencia con la medida del equipo. El Centro Nacional de Metrología (CENAM) cuenta con los patrones primarios de medición de flujo de gas (pistón y campana de calibración), los cuales tienen los rangos de medición de 0,05 a 50 L/min, y de 50 a 2840 L/min, respectivamente. Por lo anterior el objetivo de este trabajo es establecer patrones secundarios de medición de flujos de gases confiables utilizando microtoberas de flujo crítico, con una incertidumbre baja y costeables.

2. Marco Teórico

2.1 Principio de funcionamiento del flujo crítico.

Cuando un flujo compresible pasa por una sección convergente-divergente, la velocidad del gas alcanza un valor máximo en el punto de mínima área (garganta de la tobera), y la velocidad del fluido en la garganta se incrementa en función de una diferencia de presiones corriente arriba y corriente abajo de la misma. El valor límite de esta velocidad es la velocidad del sonido o condición crítica [7]. Bajo esta condición se dice que la tobera está bloqueada o estrangulada, dado que el bloqueo es una restricción física provocada por el flujo crítico, es donde se obtiene la máxima cantidad de flujo másico que puede circular por la garganta de la tobera.

En un flujo unidimensional con viscosidad despreciable, teóricamente se puede utilizar una relación para predecir el comportamiento metrológico de la tobera de flujo crítico, y usando esta aproximación, se puede demostrar que un flujo “ideal” a través de una tobera es gobernada por la siguiente relación [5].

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{P_o A^* C^*}{\sqrt{R_{gas} T_o}} \quad (1)$$

Dónde: P_o - es la presión de estancamiento; T_o - es la temperatura de estancamiento; C^* - es el factor de flujo crítico; A^* - es el área de la garganta de la tobera, y R_{gas} - es la constante específica del gas. Este modelo analítico asume que el flujo a través de la tobera presenta características de flujo crítico ($Ma = 1$). Este modelo analítico asume que el flujo a través de la tobera presenta características de flujo crítico ($Ma = 1$). De acuerdo al CODATA 2018 la constante universal de los gases es igual a $R_u =$



8,314 462 618 [J mol⁻¹ K⁻¹]. La masa molecular del aire seco es igual a 28,96546 kg/kmol [7].

Si se requiere una mayor precisión en el cálculo del flujo másico, se recomienda calibrar experimentalmente la tobera, donde el coeficiente de descarga de la tobera es un suplemento a las consideraciones impuestas al flujo ideal, ecuación (1).

El coeficiente de descarga C_d [5] es definido como:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (2)$$

El coeficiente de descarga es siempre menor que la unidad, esta condición asume que el C_d es calculado usando el diámetro real de la garganta y el flujo másico no es afectado por el fenómeno de relajación vibracional [8]. Para una geometría de una tobera dada, el coeficiente de descarga varía como una función de la relación del flujo que pasa a través de ésta, y comúnmente, esta función se expresa en términos del número de Reynolds definido como [5]:

$$Re = \frac{4\dot{m}_{real}}{\pi \cdot d \cdot \mu_0} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \left(\frac{145,8T_0^{1,5}}{110,4+T_0} \right) \quad (4)$$

Dónde: μ_0 - está dada en Pa·s y T_0 en Kelvin: (Wright, 1998).

2.2 Cálculo del coeficiente de descarga C_d :

La metodología proporcionada por la norma ISO-9300, para calcular el flujo másico a través de la tobera de flujo crítico cuenta con las siguientes restricciones:

- Flujo isentrópico.
- Flujo unidimensional
- Viscosidad despreciable

Con estas restricciones se complementan las ecuaciones (1, 2 y 3) con las siguientes expresiones:

El coeficiente de flujo crítico C^* engloba los cambios termodinámicos en el flujo isentrópico de las condiciones de estancamiento en la garganta de la tobera. En aplicaciones con gases reales C^* depende de la presión, temperatura y composición química del gas [8].

$$C^* = 0,68309 + 1,42025 \times 10^{-5} T_0 - 2,80046 \times 10^{-5} T_0^2 + 3,47447 \times 10^{-5} P_0 - 1,80997 \times 10^{-7} P_0 T_0 + 2,46278 \times 10^{-10} P_0 T_0^2 \quad (5)$$

Dónde: P_0 - está dada en kPa, T_0 - en Kelvin y C^* es el factor de flujo crítico de Johnson- es un factor adimensional [8],[10].

$$Ma = \frac{4\dot{m}}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \sqrt{\gamma \cdot R_{gas} \cdot T_0}} \quad (6)$$

El flujo esta dado en kg/s, d en metros, ρ en kg/m³, γ es un factor adimensional, R_{gas} - se expresa en J/kg·K, T_0 - en Kelvin.

La relación de los calores específicos γ se puede determinar por [8],[10]:

$$\gamma = 1,39263 + 7,915 \times 10^{-5} T_0 - 1,822 \times 10^{-7} T_0^2 + \left(\frac{20,2}{T_0} \right)^{2,36} \left(\frac{P_0}{101,325} \right)^{1,015} \quad (7)$$

Donde, P_0 está dado en kPa y T_0 - en Kelvin.

Finalmente, el coeficiente de descarga C_d [4], se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{4 \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{R_{gas} \cdot T_0}}{\pi \cdot d^2 \cdot C^* \cdot P_0} \quad (8)$$

2.3 Instrumentos, equipo de calibración y estimación de la incertidumbre.



Durante la calibración, es necesario medir presión y temperatura de estancamiento a la entrada de la tobera, así como también medir presión y temperatura en el patrón de calibración (salida de tobera). La medición de la presión tanto en la tobera como en el patrón se realizó empleando transductores de presión, los cuales tienen un rango de presión absoluta de 0 a 1000 kPa, y la medición de temperatura se realizó utilizando termocoples, y su rango de medición es de 0 a 50 °C con una resolución de 0,001 °C. La instalación de las toberas en los patrones se realizó empleando dos tubos conectores. En el tubo corriente arriba de la tobera se instala el transductor de presión y el termocople para la medición de las condiciones de estancamiento, y en el tubo corriente abajo de la misma es conectada la alimentación del patrón. A este montaje se le instala una válvula reguladora de presión corriente arriba de la tobera, para el ajuste de la presión de estancamiento.

El funcionamiento de los patrones está basado en la medición del tiempo, para recolectar un volumen de gas conocido [10]. El pistón de calibración consta de un tubo de vidrio de precisión por el cual se desplaza un embolo de diámetro menor al tubo de vidrio, una ranura en la periferia del embolo retiene mercurio, el cual forma un ligero sello entre el embolo y el tubo, este sistema es una terminal dinámica ya que el fluido colectado inicia y termina el movimiento del pistón, el rango de este patrón es de 0,05 a 50 L/min.

La campana de calibración consiste en un tanque cilíndrico abierto en la parte superior y un fluido, los cuales forman un sistema anular que es llenado en su alrededor con vapor de aceite de baja presión que sirve como sello mecánico, un tanque cilíndrico abierto en la parte inferior y con un domo en la parte superior (campana) es insertado en el aceite del tanque inferior, el peso de la campana necesita ser balanceado por un

contrapeso, este permitirá subir o bajar la campana con una pequeña diferencia de presiones ($P < 1$ kPa); esto permite la colección y medición del volumen de gas conocido, ver figura 1.

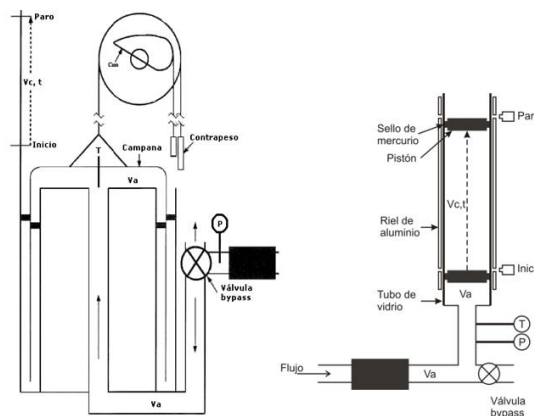


Figura 1 Esquema del patrón nacional de flujo Campana (izquierda) y pistón (derecha), V_a volumen de entrada, V_c volumen colectado, T y P localización de transductores de presión y temperatura.

El flujo que desplaza al pistón o campana es calculado por la medición de los pulsos y el tiempo de recolección, la ecuación que permite calcular el flujo a través de los patrones es la siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot 60}{K \cdot t} \quad (9)$$

Donde Q es el flujo volumétrico, K es una constante igual a 543,2 pulsos / L para el patrón de campana y 13655,8 pulsos / L para el pistón, C es el número de pulsos y t es el tiempo de recolección. El flujo másico que circula por la tobera se calcula al multiplicar la ecuación nueve por la densidad del gas en la campana o pistón. En la medición de la densidad del aire, la corrección por flotabilidad en el aire húmedo es a menudo la mayor componente de incertidumbre [2]. Además, que la humedad en el aire provoca desviaciones en el comportamiento ideal de las propiedades termodinámicas del flujo [7], por lo que, para utilizar las ecuaciones antes planteadas,



la calibración se realizará bajo las condiciones de flujo $HR \approx 0$, y por tanto el cálculo de ρ , γ y $*C$, se calcularán en condiciones de aire seco y por tal motivo las ecuaciones 5, 7 y 10 son válidas. La densidad se calcula por [10]:

$$\rho = \frac{1}{1,23838 + 287,04 \frac{T_P}{P_P} - 3012,2T^{-1,334}} + \frac{1}{-7,3049 \times 10^{-4} \frac{P_P}{T_P} + 2,5304 \times 10^{-2} \frac{P_P}{T_P^{1,25}}} \quad (10)$$

Donde la densidad está dada en kg/m^3 , P_P tiene unidades de kPa y T_P en Kelvin.

Finalmente, en este trabajo se calculará la estimación de la incertidumbre para cada una de las toberas calibradas, para ello propone usar la ley de propagación de la incertidumbre [10], y el procedimiento se describe a continuación:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{xi}^2 \quad (11)$$

Si $f = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ entonces $u(f)$ es dada por la ecuación número 11. Donde N es el número de contribuciones y x_i es cada una de las contribuciones de incertidumbre, sustituyendo el C_d de la ecuación 8 en la ecuación 11 se tiene:

$$u_{Cd} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial C_d}{\partial x_i} \right)^2 u_{xi}^2} \quad (12)$$

Las fuentes de incertidumbre son tomadas de la ecuación 8 y son:

$$x_1 = T_0, \quad x_2 = P_0 \quad \text{y} \quad x_3 = \dot{m}$$

Sustituyendo x_1 , x_2 y x_3 en la ecuación 12 se tiene:

$$u_{Cd} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_d}{\partial T_0} \right)^2 u_{T_0}^2 + \left(\frac{\partial C_d}{\partial P_0} \right)^2 u_{P_0}^2 + \left(\frac{\partial C_d}{\partial \dot{m}} \right)^2 u_{\dot{m}}^2 + (u_{Cd})^2} \quad (13)$$

Esta ecuación es válida ya que se desprecian las contribuciones por correlación entre variables. Donde u_{T_0} es determinada por:

$$u_{T_0} = u_B(T_0) \quad (14)$$

Donde u_B es la incertidumbre del tipo B y es obtenida por la resolución del instrumento. Esta ecuación es una distribución del tipo rectangular [14].

$$u_B(T_0) = \frac{\text{resolución}}{\sqrt{12}} \quad (15)$$

El cálculo de u_{P_0} se efectúa de la misma forma que el de u_{T_0} , por lo cual la ecuación 15 es aplicada para el cálculo de esta incertidumbre [10].

La incertidumbre del flujo $u_{\dot{m}}$ es estimada de la ecuación 9, a esta ecuación se le agrega la densidad del fluido para obtener el flujo másico de la tobera:

$$\dot{m} = \frac{C \cdot 60}{K \cdot t} \rho \quad (16)$$

Las fuentes de incertidumbre de esta ecuación son los pulsos (C), la constante del patrón (K), el tiempo (t) y la densidad (ρ). Sustituyendo las fuentes de incertidumbre en la ecuación 11 se tiene:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial C} \right)^2 u_C^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial K} \right)^2 u_K^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right)^2 u_t^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \right)^2 u_{\rho}^2} \quad (17)$$



Los coeficientes de sensibilidad son establecidos de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial C} = \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial C} \right) \left(\frac{C}{\dot{m}} \right) = \left(\frac{\rho}{Kt} \right) \left(\frac{CKt}{C\rho} \right) = 1 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} = \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \right) \left(\frac{\rho}{\dot{m}} \right) = \left(\frac{C}{Kt} \right) \left(\frac{\rho Kt}{C\rho} \right) = 1 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial K} = \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial K} \right) \left(\frac{K}{\dot{m}} \right) = \left(-\frac{C\rho}{K^2 t} \right) \left(\frac{K^2 t}{C\rho} \right) = -1 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right) \left(\frac{t}{\dot{m}} \right) = \left(-\frac{C\rho}{Kt^2} \right) \left(\frac{Kt^2}{C\rho} \right) = -1 \quad (21)$$

Las incertidumbres de u_C , u_t , u_ρ y u_K son establecidas por certificado de calibración de los instrumentos de medición, por la estabilidad en la medición y por repetibilidad. El cálculo de la incertidumbre estándar de los pulsos y del tiempo serán calculadas de los datos medidos durante la calibración.

Al sustituir los valores de los coeficientes de sensibilidad y los valores de u_C , u_t , u_K y u_ρ en la ecuación 17, se puede estimar el valor de la incertidumbre del flujo másico. Esta incertidumbre es proporcionada por el laboratorio de flujo y volumen del Centro Nacional de Metrología (CENAM) y es igual a:

$$u_m = 0,15\%$$

El cálculo de la incertidumbre relativa por repetibilidad en la medición del coeficiente de descarga u_{cd} , es calculada con la desviación estándar “s” del C_d dividida entre la raíz del número de mediciones $u_{cd} = s / \sqrt{N}$, esta es una incertidumbre tipo A.

Los coeficientes de sensibilidad de la ecuación 13 son igual a:

$$\frac{\partial C_d}{\partial T_0} = 0,5, \frac{\partial C_d}{\partial P_0} = 1,0 \text{ y } \frac{\partial C_d}{\partial \dot{m}} = 1,0$$

Finalmente, haciendo los cálculos correspondientes se estima la incertidumbre del C_d para cada punto de calibración de las toberas. El cálculo se efectúa con una hoja de cálculo y los resultados se muestran en las tablas correspondientes.

3. Metodología

3.1. Procedimiento de calibración.

Para calibrar la tobera de flujo crítico con diámetro de garganta de 0,56 mm se utilizó el pistón de calibración, debido a que el rango de flujo másico de esta tobera se ajusta al intervalo de medición de este patrón. Además, como la tobera de 2,24 mm tiene una mayor capacidad de flujo, para esta tobera, la calibración se efectuó con la campana. Por otro lado, el procedimiento de calibración para ambas toberas es el mismo, ya que los patrones de calibración funcionan por el principio volumétrico [9].

Una válvula bypass es cerrada para iniciar la colección del gas en los patrones, el pistón o campana inicia su elevación (en virtud de un ligero exceso de presión $P \approx 0,5$ kPa), este desplazamiento es medido por medio de un enconder que mide el desplazamiento en forma de pulsos, durante este proceso se registra la presión y temperatura del flujo en el patrón, siguiendo este procedimiento se repite un mínimo de tres veces por cada punto de calibración.

Por otro lado, la calibración se desarrolló en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), bajo las siguientes condiciones ambientales controladas; $T_{amb} = 20,7$ °C, $P_{amb} = 80365$ Pa y $HR = 38,26\%$. Los puntos propuestos para la calibración en ambas toberas es el mostrado en la Tabla 1, en donde además se muestran las relaciones de presiones críticas para cada punto de calibración.



Tabla 1.- Puntos de calibración para ambas toberas, $P_b = 80365$ Pa.

(P_0)	(P_0)	(P_0)	(P_0)	(P_0)
200 kPa	300 kPa	400 kPa	500 kPa	600 kPa
(P_b/P_0)	(P_b/P_0)	(P_b/P_0)	(P_b/P_0)	(P_b/P_0)
0.4	0.26	0.20	0.16	0.13

Siguiendo el procedimiento anterior para cada punto de calibración se muestra en las Tablas 2 y 3 los datos promedios medidos de las tres repeticiones realizadas para cada punto de calibración de ambas toberas de flujo crítico.

Tabla 2.- Datos experimentales promedios medidos.

Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm)					
P_o (kPa)	T_o (K)	P_p (kPa)	T_p (K)	C (pulsos)	t (s)
200,83	294,21	80,78	293,93	6018,00	40,77
300,40	294,21	80,79	293,94	60313,50	27,14
400,67	294,18	80,81	293,96	60637,50	20,39
500,09	294,55	80,82	294,03	60739,67	16,33
601,25	294,59	80,83	294,02	60741,83	13,62

Tabla 3.- Datos experimentales promedios medidos.

Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm)					
P_o (kPa)	T_o (K)	P_p (kPa)	T_p (K)	C (pulsos)	t (s)
200,48	293,04	80,91	293,17	60217,33	59,51
300,49	293,17	80,92	293,16	60386,33	39,58
400,46	293,29	80,93	293,16	60460,50	29,67
500,44	293,39	80,94	293,17	60607,67	23,85
600,83	293,36	80,95	293,20	60238,50	19,66

Utilizando los datos experimentales de las Tablas 2 y 3, así como también las ecuaciones 5, 8, 9 y 10 se calcula el flujo volumétrico Q , densidad ρ , flujo másico \dot{m} , factor de flujo crítico C^* y el coeficiente de descarga C_d . Además, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3, se estima la incertidumbre en la medición (Tablas 4 y 5).

Tabla 4.- Resultados de la calibración.

Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm)					
Q (L/min)	ρ (kg/m ³)	\dot{m} (kg/s)	C^*	C_d	uCd (%)
6,49	0,96	0,00010	0,69	0,89	0,26
9,76	0,96	0,00016	0,69	0,89	0,21
13,07	0,96	0,00021	0,69	0,90	0,20
16,34	0,96	0,00026	0,69	0,90	0,19
19,60	0,96	0,00031	0,69	0,90	0,20

Tabla 5.- Resultados de la calibración.

Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm)					
Q (L/min)	ρ (kg/m ³)	\dot{m} (kg/s)	C^*	C_d	uCd (%)
111,77	0,96	0,00179	0,69	0,96	0,31
168,54	0,96	0,00270	0,69	0,97	0,27
225,08	0,96	0,00361	0,69	0,97	0,27
280,73	0,96	0,00450	0,69	0,97	0,27
338,38	0,6596	0,00543	0,69	0,97	0,27

Por medio de los números adimensionales de Reynolds (Re) y Mach (Ma), se podrán graficar los resultados de la calibración, para calcular estos números adimensionales, se utilizan las ecuaciones: 3, 4, 6 y 7. Los resultados se muestran en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6.- Cálculo de μ , γ , Re y Ma .

Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm)				
\dot{m} (kg/s)	μ (Pa·s)	Γ	Re	Ma
0,00010	0,000127	1,42	1853,06	1,28
0,00016	0,000127	1,42	2789,69	1,92
0,00021	0,000127	1,42	3735,07	2,57
0,00026	0,000127	1,42	4666,57	3,21
0,00031	0,000127	1,42	5596,66	3,85

Tabla 7.- Cálculo de μ , γ , Re y Ma .

Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm)				
\dot{m} (kg/s)	μ (Pa·s)	Γ	Re	Ma
0,0018	0,000127	1,40	8042,42	1,38
0,0027	0,000127	1,41	1212,95	2,08
0,0036	0,000127	1,41	1619,18	2,77
0,0045	0,000127	1,41	2019,60	3,46
0,0054	0,000127	1,41	2433,66	4,16



Teniendo como base los resultados de las Tablas 6 y 7, se procede a graficar el comportamiento del coeficiente de descarga en función del Re y Ma como se observa en las gráficas de las Figuras 2, 3 y 4.

4. Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos, los coeficientes de descarga de ambas toberas son incrementados en función del aumento del número de Reynolds (Figuras 2 y 3). Lo anterior tiene como consecuencia que el mejor punto de calibración para ambas toberas ocurra en régimen turbulento ($Re = 4666,57$; $C_d = 0,97$) y ($Re = 20190,60$; $C_d = 0,90$) respectivamente. Con esto se puede inferir que las fuerzas viscosas en la garganta de las toberas tuvieron una disminución considerable y, por tanto, la estrangulación en la garganta es mínima para estos valores del número de Reynolds, y, por tanto, esta condición del flujo contribuyó en los excelentes valores de los coeficientes.

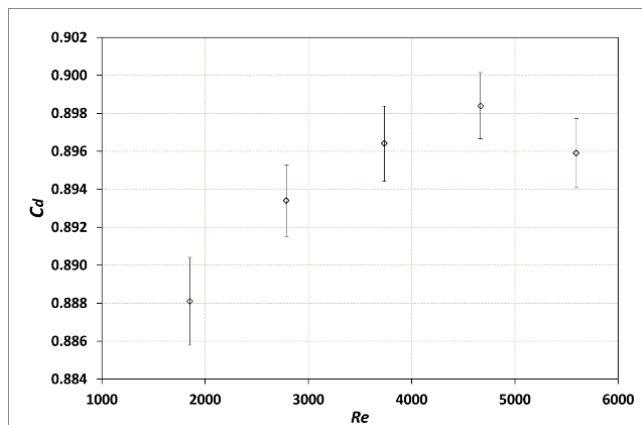


Figura 2. Tobera $d = 0,56$ mm, variación del C_d vs Re , las barras de error muestran la incertidumbre para cada punto de calibración.

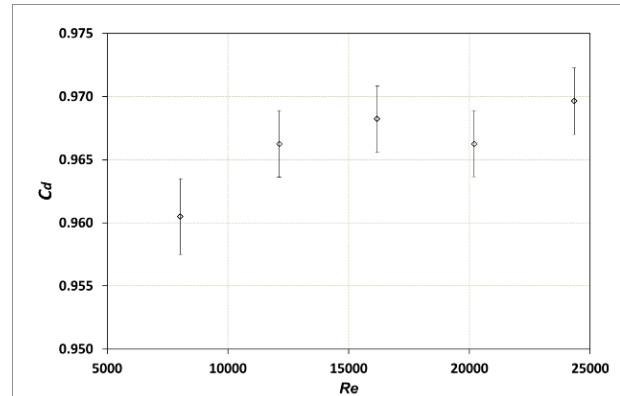


Figura 3. Tobera $d = 2,24$ mm, variación del C_d vs Re , las barras de error muestran la incertidumbre para cada punto de calibración.

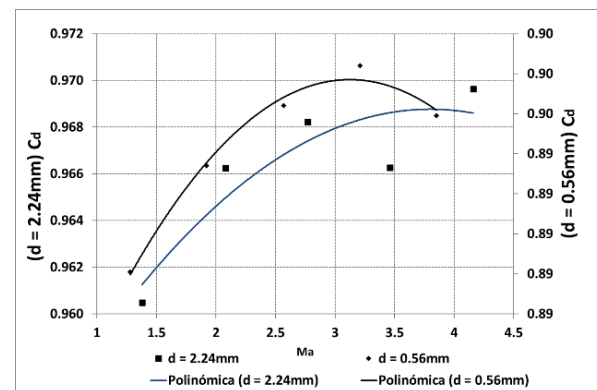


Figura 4. Variación del C_d vs Ma en ambas toberas de flujo crítico.

Por otro lado, en la Figura 4, se observan dos valores límite en donde la estrangulación de las toberas ya no es predominante en la calibración ($Ma = 3,21$ y $Ma = 3,41$), se hace esta presunción, debido a que los coeficientes de descarga presentan reducciones para estas condiciones del flujo. Esto se puede observar de mejor forma con las líneas de tendencia de los puntos de calibración, en donde el cambio de la pendiente en ambas curvas muestra el decremento del C_d . Esta reducción en el coeficiente se puede explicar por medio de las condiciones de flujo en la tobera, ya que, debido a la expansión del flujo en el difusor, la velocidad aumenta hasta la condición de flujo supersónico. Teniendo este flujo, se genera una onda de choque en el difusor, la cual tiene efectos de bloqueo en la garganta, lo



que provoca que el flujo sea frenado y, por tanto, sea disminuido el C_d .

Además, es importante resaltar que el diámetro de garganta tiene un papel importante en la calibración de la tobera, ya que como se observa en los resultados, para la tobera con $d = 0,56$ mm se tiene un $C_d = 0,90$ y para la tobera con $d = 2,24$ mm se tiene un $C_d = 0,97$ (Tablas 4 y 5), lo que indica que la calibración mejora con el aumento del diámetro de garganta.

Finalmente, la estimación de la incertidumbre en la calibración de las toberas, arroja valores aceptables, ya que solamente en un punto de calibración (0,31%, $d = 2,24$ mm) se encuentra fuera del intervalo de confiabilidad que se indica para este tipo de dispositivos de medición [5].

4. Conclusiones

De lo anterior se puede concluir que:

1. La norma ISO9300 es una guía importante en la calibración de las toberas de flujo crítico.
2. La calibración de las toberas fue satisfactoria, ya que en la literatura especializada se reportan valores muy próximos del coeficiente de descarga [4-0].
3. La incertidumbre de estas dos toberas, se encuentra dentro del intervalo de confiabilidad aceptado para estos dispositivos [5]. Sin embargo, por ser una incertidumbre alta (Tablas 4 y 5), se recomienda utilizar estas toberas solo como instrumentos terciarios de medición.
4. En régimen turbulento, el coeficiente de descarga tiene un comportamiento aceptable, y por lo tanto se recomienda la medición y calibración para esta condición del flujo.
5. Se debe evitar el régimen laminar en este tipo de dispositivos, ya que afecta la estrangulación de la tobera y por consiguiente la calibración.

6. El bloqueo en la garganta de la tobera, impide seguir aumentando los puntos de calibración, ya que el C_d comienza a disminuir.

7. El coeficiente de descarga mejora al aumentar el diámetro de garganta de la tobera.

NOMENCLATURA.

A	área
C^*	factor de flujo crítico de Johnson
C_d	coeficiente de descarga de la tobera
d	diámetro en la garganta de la tobera
Y	relación de calores específicos
m_{ideal}	flujo másico ideal
m_{actual}	flujo másico actual
u_{Cd}	incertidumbre del coeficiente de descarga
Ma	número de Mach
P_p	presión del patrón
P_{amb}	presión ambiente
R_{gas}	constante de los gases
Re	número de Reynolds
T_p	temperatura del patrón
T_o	temperatura de estancamiento
T_{amb}	temperatura ambiente
ρ	densidad del aire
μ_o	viscosidad del fluido
C	número de pulsos del encoder
t	tiempo de recolección del gas
K	constante del patrón nacional
HR	humedad relativa del fluido

SUBÍNDICES.

o	condiciones de estancamiento
$*$	condiciones críticas

5. Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen las facilidades prestadas al Centro Nacional de Metrología (CENAM) y en especial al Laboratorio de Flujo y Volumen por haber



permitido la realización de las pruebas experimentales.

6. Reconocimiento de autoría

Jesús Eduardo Rivera López; Conceptualización y metodología seguida en el desarrollo del trabajo. Alejandro Díaz Martínez; Análisis e investigación de los factores preponderantes de las corridas experimentales. Pedro Alejandro Tamayo Meza; Redacción y borrador del trabajo escrito. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes; Desarrollo de las corridas experimentales. Gabriela Esmeralda Orozco Duran; Estimación y cálculo de la incertidumbre experimental. José Luis Arciniega Martínez; Diseño y preparación de la instalación experimental.

Referencias

- [1] V, Chalco, V, “Beneficios de la conversión a gas natural en calderas de vapor”. Recuperado de <http://www.unmsm.edu.pe/cedit/linked/analisis%20de%20cambio%20de%20combustible.pdf>, 2005.
- [2] Secretaría de Energía, "PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN

- NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024", 2020.
- [3] González Escamilla, "Dinámica de gases aplicada a las toberas", Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999.
- [4] J. A. Cruz Maya, "Analytical and Numerical Characterization of the Discharge Coefficient of a Sonic Venturi Nozzle.", Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, 2014.
- [5] Norma ISO 9300 "Critical measurement of gas flow by means of flow Venturi nozzles". 1990.
- [6] V.I, Chesnokov y B.A. Ipolitov, "Estimating the Error Component Associated with the Selection of a Gas Flow Model in Critical Nozzles". Meas Tech. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1182-7>
- [7] R.W. Fox, A.T. McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics". 8th. Edition, Wiley and Sons, USA. 2011.
- [8] J.D. Wright, "The Long-Term Calibration Stability of Critical Flow Nozzles and Laminar Flowmeters," Proceedings of the 1998 NCSL Workshop and Symposium, Albuquerque, NM, NCSL, pp. 443–462. 1998.
- [9] A Picard, R S Davis, M Gläser and K Fujii, "Revised formula for the density of moist air". CIPM. 2007.
- [10] A.S. Wolfgang, R.J. Lazos Martínez, "Guía para la estimación de la incertidumbre". CENAM, 2004.

Derechos de Autor (c) 2022 Jesús Eduardo Rivera López, Alejandro Díaz Martínez, Pedro Alejandro Tamayo Mesa, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, Gabriela Esmeralda Orozco Durán, José Luis Arciniega Martínez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)