
DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE MÉTODO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Harley Montero Ramos, Mayckol Morales Castro

Instituto Nacional de Metrología de Colombia

Av. Carrera 50 No 26 - 55 Int. 2

+57 (601) 2542222 Ext. 1631 - hmontero@inm.gov.co, mmorales@inm.gov.co

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y la validación de un método de calibración para medidores de presión diferencial en el Laboratorio de Presión de la Subdirección de Metrología Física (SMF) del Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM. El método desarrollado emplea un pistón como patrón principal y un segundo equipo (pistón, manómetro o barómetro) como patrón secundario, en el cual se transfiere y monitorea la presión de línea establecida por el patrón principal. Para implementar este método, se utilizan tres sistemas de medición que cubren el intervalo desde -100 kPa hasta 250 kPa: un sistema de balanza de doble pistón, una balanza de presión absoluta con monitor de presión de referencia (RPM), y un sistema de dos balanzas de presión de alcances similares. Para validar la precisión y confiabilidad del método, se compararon mediciones repetidas en cada sistema, reportando los errores de la medición con sus correspondientes incertidumbres. La validación incluyó el cálculo del error normalizado y el análisis del cociente Q , garantizando que la incertidumbre de la presión de referencia fuera adecuada.

PALABRAS CLAVES

Presión diferencial, presión de línea, incertidumbre de medición, validación del método.

1. INTRODUCCIÓN

La diferencia entre dos valores de presión es lo que se define como presión diferencial y es muy usada para conocer la velocidad de los fluidos y niveles de los contenedores, entre otros. Sus aplicaciones son amplias en los sectores de fabricación de medicamentos y de salud debido a la necesidad de preservar la asepsia de los espacios limpios y controlar los gases empleados en los procesos, por ejemplo, dispositivos como espirómetros, biorreactores, cabinas de flujo laminar, salas limpias y procesos de envasado aséptico requieren una medición confiable de la presión diferencial, por lo tanto, una calibración adecuada de los medidores usados.

Una práctica común en los laboratorios es realizar estas calibraciones dejando a presión atmosférica el puerto de referencia (o baja), llevando a cabo mediciones de presión manométrica. Sin embargo, los resultados de las calibraciones pueden depender de la presión de línea, por lo que las mediciones deben realizarse en condiciones más cercanas al uso habitual del equipo.

Diversos estudios han abordado el desarrollo de métodos de calibración para medidores de presión diferencial. El estudio de Kojima et al. (2007) describe un procedimiento basado en el uso de dos balanzas de presión, en estas se generan presiones de línea nominalmente iguales y su diferencia se establece como el desplazamiento del cero, luego se añaden

pequeñas masas (Δm) en una de las balanzas generando diferencias de presión (ΔP). De igual forma, Rosendahl et al. (2018) explican un procedimiento de calibración de la presión diferencial mediante el uso de balanzas de presión gemelas. Sin embargo, a diferencia del método anterior, en este procedimiento se calcula la presión generada por cada balanza junto con su incertidumbre, lo que podría resultar en un valor mayor de esta incertidumbre.

Por otro lado, la nota técnica 9940TN02 DH Instruments de Delajoud y Girard (1999) introduce un procedimiento alternativo, donde se utiliza una balanza de presión absoluta junto con un monitor de presión de referencia (RPM) de alta precisión. Este método permite definir la presión diferencial como la diferencia entre la presión absoluta medida por la balanza y la presión estática registrada por el RPM. Aquí, la incertidumbre de la presión de línea está influenciada por su estabilidad a corto plazo. Un procedimiento muy similar es planteado por Yan-hua y Jun-feng (2012), en el cual la presión de línea es proporcionada y ajustada mediante la balanza de presión cuando la válvula 'bypass' está abierta y monitoreada por un manómetro. Posteriormente, se cierra la válvula y se añaden masas (Δm) al pistón, lo que genera una diferencia de presión con respecto a la presión en el manómetro, la cual se regula para que se mantenga estable y en el valor inicialmente configurado.

En estos métodos, se debe tener en cuenta las derivas de la presión de línea provocadas por cambios en las

condiciones ambientales, variaciones en la lectura, fluctuaciones de la temperatura del pistón o por la fuga natural de los pistones. Por lo tanto, estas derivas deben verificarse a intervalos cortos para garantizar una calibración más precisa (Delajoud & Girard, 1999; Rosendahl et al., 2018).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y validar un método de calibración para medidores de presión diferencial que combina los métodos anteriormente mencionados. Con la ayuda de tres sistemas de medición diferentes, se busca cubrir el intervalo de medición desde -100 kPa hasta 250 kPa. Este método utiliza un solo pistón como patrón principal y un segundo equipo, barómetro u otro pistón, para mantener y monitorear la presión de línea transmitida a este por el patrón principal.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

2.1. SISTEMAS Y MÉTODO DE MEDICIÓN

El Laboratorio de Presión de la Subdirección de Metrología Física del INM cuenta con diferentes patrones y equipos auxiliares cuyas mediciones son metrologicamente trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). A continuación, se describen los sistemas utilizados para las mediciones de presión diferencial.

NIM	SISTEMA	ALCANCE	FABRICANTE
041013	Balanza de doble pistón EP-G25k-D para presiones bajas.	(0 a 10) kPa	Europascal
041010	Balanza PG7601 con Pistón 806 más Monitor de presión de Referencia – RPM	(-100 a 0) kPa (0 a 250) kPa	DH Instruments
041010 041007	Dos balanzas de presión similares: Pistones 806 y M682	(0 a 250) kPa	DH Instruments Pressurements

Tabla 1. Sistemas de medición de Presión Diferencial

En todos los casos, se establece el valor de presión de línea P_L utilizando el pistón patrón principal, con la válvula de derivación “bypass” abierta se transfiere a un segundo patrón que monitorea que la presión se mantenga en el valor establecido.

En el primer sistema se ubican dos pistones que generan presiones iguales de 300 Pa. Inicialmente, se abre la válvula de derivación, lo que comunica los dos puertos del Instrumento Bajo Calibración – IBC (DUT, por sus siglas en inglés), tras un periodo de estabilización se realiza el ajuste de cero del IBC. Posteriormente, se cierra la válvula y se toma la lectura del instrumento, este proceso se repite 10 veces para determinar la desviación entre los dos pistones para calcular el valor corregido de P_L .

Finalmente, se añaden las pesas al pistón patrón para generar la presión de alta P_H necesaria para una diferencia deseada ($P_H - P_L$).

En los otros casos, se utilizó la balanza de presión DH Instruments PG7601 equipada con el pistón 806. El segundo sistema de medición consiste en la balanza operada en modo absoluto junto con el RPM (Figura 1.). Para regular la presión de línea, se colocan las pesas indicadas para la presión absoluta deseada P_L , hasta 100 kPa, con las válvulas 9 y 10 abiertas, permitiendo el flujo de gas hacia ambos puertos de salida. La presión se transmite al RPM y a un cilindro de volumen constante, el cual contribuye a mejorar la estabilidad. Este procedimiento se repite 10 veces al inicio de la calibración, registrando el valor indicado por el RPM. El valor medio de estas mediciones se monitorea durante toda la calibración, asegurando que no varíe más de 1 Pa. Por último, se cierra la válvula bypass, y en la balanza se genera ahora una presión absoluta P_H , que puede ser inferior a la presión de línea P_L , obteniendo así una presión diferencial negativa de hasta -100 kPa.

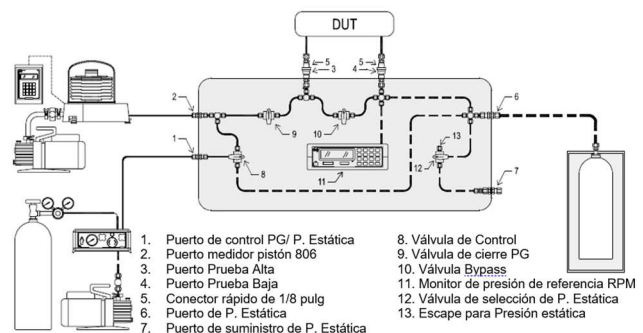


Fig. 1. Esquema para medición en modo diferencial con balanza PG7601. (Delajoud & Girard, 1999)

De manera similar, para el tercer sistema, que emplea dos balanzas de presión (ver Figura 2.), se colocan las pesas necesarias para establecer la presión de línea en ambos pistones. Luego, se añaden pequeñas masas hasta alcanzar el equilibrio entre los pistones, siguiendo un procedimiento similar al método de flotación cruzada. Este proceso se repite, verificando que la diferencia entre los valores de masas añadidas para el equilibrio no supere los 100 mg, que equivale a una variación de aproximadamente 1 Pa en el pistón patrón.

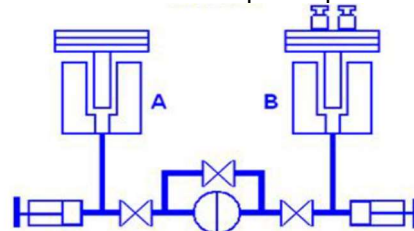


Fig. 2. Sistema de medición usando dos balanzas de presión. (Zuñiga et al., 2008)

El mensurando en estas calibraciones, de acuerdo con lo expresado por Sabuga et al. (2019) en la Guía de Calibración EURAMET N° 17, es el error de medición de la presión diferencial (E). El modelo matemático se encuentra en la Ecuación 1:

$$E = P_{ind} - P_{Ref} + \delta p_{desv0} + \delta p_{rep} + \delta p_{his} , \quad (1)$$

donde P_{ind} es la presión indicada por el IBC, δp_{desv0} , δp_{rep} y δp_{his} son las correcciones por desviación del cero, repetibilidad e histéresis respectivamente. P_{Ref} es la presión de referencia generada por el sistema de medición, y se calcula utilizando la Ecuación 2.

$$P_{Ref} = (P_H - P_L) + \delta P_{\Delta h} + \delta P_{\mu} + \delta P_H + \delta P_L , \quad (2)$$

donde $(P_H - P_L)$ representa la diferencia de presión entre el patrón principal y la presión de línea. δP_H y δP_L son las correcciones por variaciones en las presiones de los patrones, δP_{μ} es la corrección por presión residual y $\delta P_{\Delta h}$ es la corrección de presión por diferencia de alturas entre el patrón y el IBC.

Cuando se utilizan balanzas de presión como patrones, el valor de la presión se expresa mediante la Ecuación 3:

$$P_H = \frac{\sum \Delta m g_l \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)}{A_0 [1 + \alpha(t - t_0)](1 + \lambda P_n)} , \quad (3)$$

con Δm como la masa añadida al pistón, g_l el valor local de la aceleración de caída libre, ρ_a la densidad del aire y ρ_m la densidad de las masas empleadas. A_0 es el área del pistón-cilindro a presión nula y temperatura de referencia t_0 , mientras α es el coeficiente de dilatación térmica y λ el coeficiente de deformación con la presión nominal del pistón P_n .

Los resultados de la incertidumbre fueron evaluados siguiendo los principios establecidos en la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición (GUM). De acuerdo con la Ecuación 2, la incertidumbre de la presión de referencia en este método de medición se estima de la siguiente manera:

$$u_{P_{Ref}} = \sqrt{u_{P_H}^2 + u_{\delta P_{\Delta h}}^2 + u_{\delta P_{\mu}}^2 + u_{\delta P_H}^2 + u_{P_L}^2 + u_{\delta P_L}^2} \quad (4)$$

Finalmente, se estima la incertidumbre combinada del error de la medición de presión diferencial siguiendo la Ecuación 5:

$$u_{\Delta p} = \sqrt{u_{P_{Ref}}^2 + u_{P_{ind}}^2 + u_{desv0}^2 + u_{rep}^2 + u_{his}^2} \quad (5)$$

2.2. METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Para llevar a cabo la validación se emplea como IBC un transmisor de presión diferencial de 6 kPa y un Error Máximo Permissible – EMP de 0.05 %FS. La

validación del método de calibración consiste en realizar cuatro (4) calibraciones al mismo ítem, comparando mediante el cálculo de Error Normalizado (E_n) los resultados obtenidos con los tres sistemas de medición frente a los resultados del método estandarizado en presión manométrica descrito por Sabuga et al. (2019), dejando el puerto de baja del IBC al aire. Para minimizar las posibles variaciones en los resultados por presión de línea, se establecen valores lo más cercano posibles a la presión atmosférica. La calibración en presión manométrica, dado el alcance del IBC, se realiza con la balanza EP-G25k-D.

Para determinar el Error Normalizado se emplea la Ecuación 6. En esta se compara el error de medición resultante de la calibración por el método de presión diferencial E_{dif} con el resultado del método estandarizado en presión manométrica E_{man} y sus respectivas incertidumbres U_{dif} y U_{man} .

$$E_n = \frac{|E_{dif} - E_{man}|}{\sqrt{U_{dif}^2 + U_{man}^2}} \quad (6)$$

De acuerdo con el formalismo asociado al estadístico, se tienen los siguientes requisitos para su evaluación:

- Si $E_n < 1$, la prueba se considera satisfactoria.
- Si $E_n \geq 1$, la prueba se considera no satisfactoria.

Adicionalmente, se evalúa la incertidumbre de la presión de referencia, es decir, de los patrones y el método empleado. Para esto, se emplea el factor o cociente Q , verificando que la incertidumbre de la presión de referencia sea menor o igual a la tercera parte de la incertidumbre pretendida del IBC.

El cociente Q se define como la relación entre la incertidumbre pretendida u_{pret} y la incertidumbre de la presión de referencia $u_{P_{Ref}}$. En la Ecuación 7, u_{pret} se denota por la distribución rectangular del EMP, mientras que $u_{P_{Ref}}$ no en cuenta la $u_{\delta P_{\Delta h}}$ dado que esta no depende del método.

$$Q = \frac{EMP/\sqrt{3}}{u_{P_{Ref}}} \quad (7)$$

Si $Q > 3$, la calibración se considera aceptable; sin embargo, si $Q \leq 3$, indica que el patrón o el método de medición contribuyen con incertidumbres elevadas, las cuales deben ser reducidas para cumplir con esta condición previa de calibración.

3. RESULTADOS

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la calibración del transmisor de presión diferencial obtenidos para cada uno de los sistemas de medición evaluados, junto con los resultados de la calibración en presión manométrica. Los resultados incluyen el error de medición y su incertidumbre, la gráfica de la Figura 3 ilustra estos resultados.

Presión nominal	Método Presión manométrica		Balanza doble pistón		Balanza + RPM		Dos balanzas	
	Presión de línea	0 kPa (75 kPa abs)	Presión de línea	0.3 kPa	Presión de línea	75.7 kPa abs	Presión de línea	27 kPa
kPa	Error (kPa)	U (kPa)	Error (kPa)	U (kPa)	Error (kPa)	U (kPa)	Error (kPa)	U (kPa)
0.00	0.00002	0.00025	0.00003	0.00027	0.0001	0.0014	0.00005	0.00087
0.50					-0.0008	0.0015	-0.00088	0.00091
1.00	-0.0009	0.00037	-0.00075	0.00039	-0.0017	0.0015	-0.00103	0.00089
1.50	-0.00147	0.00043	-0.0013	0.00044	-0.0022	0.0015	-0.00103	0.00093
2.00	-0.00167	0.00084	-0.00162	0.00084	-0.0027	0.0015	-0.00108	0.00093
2.50	-0.00157	0.00088	-0.00156	0.00088	-0.0025	0.0015	-0.00124	0.00091
3.00	-0.00187	0.00091	-0.00176	0.00091	-0.0027	0.0015	-0.00123	0.00099
3.50	-0.00231	0.00095	-0.00217	0.00095	-0.0033	0.0015	-0.00114	0.00097
4.00	-0.00257	0.00098	-0.00261	0.00098	-0.0036	0.0015	-0.00169	0.00099
4.50	-0.0022	0.0011	-0.0022	0.0011	-0.0030	0.0016	-0.00088	0.00094
5.00	-0.0015	0.0011	-0.0015	0.0011	-0.0024	0.0015	-0.00013	0.00099
5.50	-0.00057	0.00093	-0.00073	0.00092	-0.0012	0.0015	0.00044	0.00095
6.00	-0.00306	0.00099	-0.00323	0.00099	-0.0038	0.0016	-0.00181	0.00096

Tabla 2. Resultados de las calibraciones

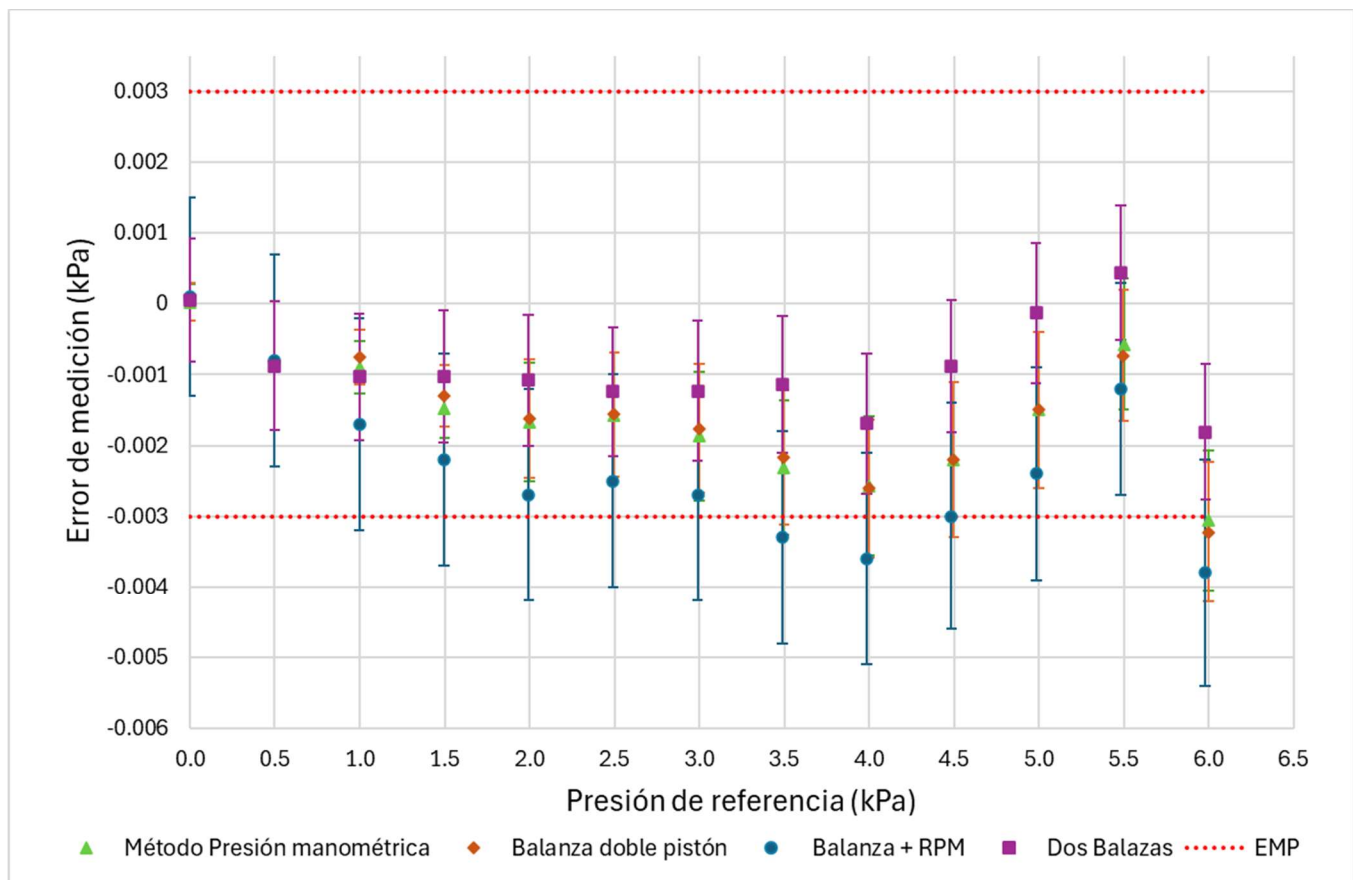


Fig. 3. Resultados de las calibraciones

3.1. INCERTIDUMBRE DE P_{Ref} DE CADA SISTEMA

La grafica en la Figura 4 muestra las incertidumbres de la presión de referencia en los tres diferentes

sistemas empleados. Se observó que el sistema que emplea una balanza operando en modo absoluto junto con el RPM fue el que presentó la mayor contribución a la incertidumbre. Este comportamiento

se atribuye a las variaciones en la presión del patrón $u_{\delta P_H}$, las cuales fueron consecuencia de la dificultad de realizar las mediciones a un mismo valor de presión residual; y a la incertidumbre de la presión de línea u_{P_L} , que al ser generada por la balanza en modo absoluto suele ser mayor que la incertidumbre de la balanza en modo manométrico (ver Tabla 3).

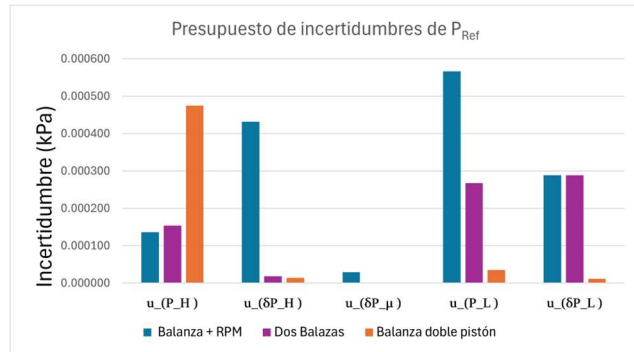


Fig. 4. Presupuesto de incertidumbres de P_{Ref}

La incertidumbre de la presión de referencia para el sistema de doble pistón estuvo mayormente determinada por la incertidumbre del patrón u_{P_H} , lo que reveló una alta repetibilidad del sistema de medición. Este comportamiento fue similar al observado cuando se utilizaron dos balanzas, donde la incertidumbre estuvo dominada por la incertidumbre de la presión de línea y su variación.

Presupuestos de $u_{P_{Ref}}$	Balanza doble pistón	Balanza + RPM	Dos balanzas
u_{P_H} (kPa)	0.000475	0.000136	0.000154
$u_{\delta P_H}$ (kPa)	0.000014	0.000432	0.000018
$u_{\delta P_\mu}$ (kPa)	0.000000	0.000030	0.000000
u_{P_L} (kPa)	0.000035	0.000567	0.000267
$u_{\delta P_L}$ (kPa)	0.000012	0.000289	0.000289

Tabla 3. Presupuesto de incertidumbres de P_{Ref}

3.2. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Como se observa en la Tabla 4, de errores normalizados, los valores obtenidos con la balanza de doble pistón fueron consistentemente más bajos que los de los otros sistemas, lo cual era de esperarse, ya que este sistema utiliza la misma balanza empleada para el método manométrico.

El error normalizado para el sistema que combina la balanza de presión absoluta y el RPM mostró resultados favorables, esto se debió principalmente a su alta incertidumbre de la presión de referencia, tal como se explicó anteriormente. Por otro lado, el sistema de dos balanzas presentó una mayor desviación, especialmente a partir de 3.5 kPa; sin embargo, sus resultados fueron satisfactorios.

Error normalizado			
Presión Nominal (kPa)	Balanza doble pistón	Balanza + RPM	Dos balanzas
0.00	0.027	0.056	0.033
1.00	0.279	0.518	0.135
1.50	0.276	0.468	0.429
2.00	0.042	0.599	0.471
2.50	0.008	0.535	0.261
3.00	0.085	0.473	0.476
3.50	0.104	0.558	0.862
4.00	0.029	0.575	0.632
4.50	0.000	0.412	0.912
5.00	0.000	0.484	0.926
5.50	0.122	0.357	0.760
6.00	0.121	0.393	0.906

Tabla 4. Error normalizado de cada sistema

Los resultados del factor Q en Tabla 5 indican que tanto la balanza de doble pistón como el sistema que usa dos balanzas contribuyen a una incertidumbre que es al menos tres veces más pequeña que la incertidumbre pretendida del transmisor. Por otro lado, para el conjunto balanza + RPM los valores del cociente Q es menor o igual que 3 para todo el intervalo de medición, producto del bajo alcance del IBC, 6 kPa, con respecto al alcance del pistón patrón, 350 kPa.

Factor de selección de patrón Q			
Presión Nominal (kPa)	Balanza doble pistón	Balanza + RPM	Dos balanzas
0.00	14	3	4
1.00	10	3	4
1.50	8	2	4
2.00	7	2	4
2.50	6	2	4
3.00	6	3	4
3.50	5	3	4
4.00	5	3	4
4.50	4	2	4
5.00	4	2	4
5.50	4	2	4
6.00	4	2	4

Tabla 5. Factor Q para cada sistema

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación demostraron la efectividad del método de calibración desarrollado para medidores de presión diferencial, en particular, el uso de la balanza de doble pistón demostró ser un sistema de medición confiable.

Por otro lado, el sistema que combina la balanza de presión absoluta con el RPM exhibió resultados favorables en relación con el error normalizado; sin embargo, la alta incertidumbre asociada al método indica la necesidad de implementarlo con mayor cuidado. En contraste, el sistema de dos balanzas

mostró una mayor desviación, especialmente a partir de 3.5 kPa, aunque también reveló significativamente una reducción de la incertidumbre de la presión de referencia.

Se evidencia que un pistón con un alcance de cientos de kPa puede utilizarse para medir valores de presión diferencial de tan solo 0.5 kPa, abriendo la posibilidad de usar este método para realizar verificaciones de sistemas de muy baja presión, inferiores a 2 kPa, superando así el desafío que presenta la presión mínima que puede generar un pistón debido a su propia masa.

5. CONCLUSIONES

Se implementó y validó un método de calibración para medidores de presión diferencial que combina métodos previamente desarrollados en otros institutos de metrología. Con la ayuda de tres sistemas de medición diferentes, se podrían realizar calibraciones desde -100 kPa hasta 250 kPa. Se demostró que se puede utilizar un solo pistón como patrón principal, este mismo genera la presión de línea que es transmitida a un segundo equipo donde se mantiene estable.

Los resultados obtenidos evidencian que los sistemas de medición basados en la balanza de doble pistón EP-G25k-D, como la disponibles en el Laboratorio de Presión del INM, son muy confiables para calibraciones de pequeñas presiones diferenciales, hasta 10 kPa. Adicionalmente, se demostró que el sistema que utiliza dos balanzas ofrece una baja incertidumbre y muestra ser versátil en el intervalo de medición.

La alta incertidumbre observada en el sistema conjunto balanza de presión absoluta con el RPM sugiere que se deben realizar ajustes para optimizar su aplicación en bajas presiones diferenciales. Sin embargo, para presiones más altas el sistema funcionaría muy bien, además para presiones diferenciales negativas, ya que en este sistema se pueden generar presiones absolutas por debajo de la presión atmosférica.

Por todo lo anterior, Se considera valido y listo para su implementación el método de calibración para equipos medidores de presión diferencial.

AGRADECIMIENTOS

A la Subdirección de Metrología Física del Instituto Nacional de Metrología – INM, en especial a los compañeros de los laboratorios de Presión y Flujo de Gas, por su colaboración.

REFERENCIAS

- [1] Kojima, M., Saitou, K., & Kobata, T. (2007). Study on calibration procedure for differential pressure transducers. *3rd IMEKO TC16 International Conference on Pressure Measurement 2007*, 77–82.
- [2] Rosendahl, M., Nazareth, R. S., Magalhaes, M. R., Silva, W. S., Ferreira, P. L. S., Gouveia, J. M., Farias, M. H., Oliveira, J. S., & Couto, P. R. G. (2018). New calibration procedure for differential pressure using twin pressure balances for flowrate measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, 1044(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1044/1/012053>
- [3] Delajoud, P., & Girard, M. (1999). Technical Note 940TN02: PG7000 Differential Mode for Defining Low and Negative Differential Pressure At Various Static Pressures. *DH Instruments, Inc.* <https://download.flukecal.com/pub/literature/9940TN02.PDF>
- [4] Yan-hua, L., & Jun-feng, S. (2012). A New Method for Low Differential Gauge Pressure Measurement Based on Piston Gauge and Digital Pressure Gauge. *Acta Metrologica Sinica*, 33(6), 528–531.
- [5] Sabuga, W., Ott, O., Durgut, Y., Šetina, J., Otal, P., Medina, N., & Altintas, A. (2019). *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*. EURAMET CG 17.
- [6] Zuñiga, S., Olvera, P., & Torres, J. (2008). Caracterización de un Manómetro Diferencial Digital Usado como Patrón de Transferencia a 3 , 5 kPa. *Simposio de Metrología 2008*.