

Calibración de un manómetro tipo Bourdon mediante un banco generador de alta presión empleando aceite mineral hidráulico como fluido

Calibration of Bourdon pressure gauge by high pressure generator bench using hydraulic mineral oil

Sebastián Buitrago Hernández¹, Harold Orlando Sánchez Abril², Heiner Giovanni Cárdenas Larrota³, Javier Alejandro Manrique Pérez⁴ y Alejandro Muñoz Rodríguez⁵

Resumen

En este artículo se presenta cómo se realizó la calibración en presión relativa positiva de un manómetro analógico tipo Bourdon, con una clase de exactitud de 1,5% de la escala total. El método empleado fue el de comparación directa, utilizando como patrón un manómetro digital con una clase de exactitud de 0,1% del total de la escala. Como medio generador se empleó un banco de presión con un alcance de 0 a 36 000 psi. El fluido empleado para el proceso fue aceite mineral hidráulico. Para garantizar la estabilidad de las condiciones ambientales, este proceso se desarrolló en las instalaciones del laboratorio de metrología Calibration Service S.A.S. en el área de Magnitud de Presión. Se evidenció que el error máximo obtenido en el proceso de calibración fue de $690 \text{ kPa} \pm 555 \text{ kPa}$, ($100 \text{ psi} \pm 81 \text{ psi}$). De

acuerdo a las especificaciones del fabricante, el equipo tiene un error máximo permisible de $\pm 1,5\%$ del rango total del instrumento bajo calibración (IBC), correspondiente a $3102,64065 \text{ kPa}$ (450 psi). Así, se concluye que se encuentra dentro de los parámetros.

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Correo: sbuitragoh1@ucentral.edu.co.

² Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Correo: hsancheza@ucentral.edu.co.

³ Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Correo: hcardenasl@ucentral.edu.co

⁴ Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Correo: jmanriquep1@ucentral.edu.co

⁵ MSc en ingeniería mecánica de la Universidad Nacional de Colombia, docente de la Universidad Central y coordinador de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica. Correo: amunozr3@ucentral.edu.co.

Palabras clave: calibración, Bourdon, manómetro, presión, sistema de medición.

Abstract

The relative positive pressure calibration of a Bourdon analog pressure gauge, with an accuracy class of 1,5 % of the total scale, was used by direct comparison using a digital pressure gauge with an accuracy class of 0,1 % of the total of the scale, as a generator was used a pressure bench with a range of 0 psi to 36 000 psi, the fluid used for the process was hydraulic mineral oil. To guarantee the stability of the environmental conditions, this process was

developed in the facilities of the metrology laboratory Calibration Service S.A. S. - magnitude of pressure. It was evidenced that the maximum error obtained in the calibration process was $690 \text{ kPa} \pm 555 \text{ kPa}$, ($100 \text{ psi} \pm 81 \text{ psi}$), according to the manufacturer's specifications the equipment has a maximum permissible error of $\pm 1,5\%$ of the range Total of the IBC corresponding to $3102,64065 \text{ kPa}$ (450 psi), so it is concluded that the instrument under calibration (IBC) is within parameters.

Keywords: Calibration, Bourdon, Pressure Gauge, Manometer, Pressure, Measurement System.

1. Introducción

Eugène Bourdon es el inventor de uno de los instrumentos más conocidos por los ingenieros en todo el mundo. El manómetro, o tubo de Bourdon, ha sido el equipo más utilizado para la medición de presión tanto en laboratorios como en la industria, desde su introducción a mediados del siglo XIX. Su aparición en el mercado europeo, y casi inmediatamente después en el americano, se constituyó en el punto de partida para el reemplazo del manómetro de mercurio por un elemento que respondía a la aplicación de un principio físico diferente. Su invención permitió desarrollos en áreas relacionadas de instrumentación y control de procesos (Reif-Acherman, Machuca-Martínez, 2010).

A pesar de que actualmente existe una gran variedad de equipos diseñados para realizar mediciones en presión de fluidos (líquidos y gases),

para el desarrollo de este trabajo se usó un manómetro analógico tipo Bourdon, debido a que son instrumentos muy comunes en la industria por ser de bajo costo y, asimismo, por las características metrológicas y la vida útil que ofrecen.

El funcionamiento del manómetro tipo Bourdon es muy sencillo. Cuando se genera presión, el fluido ingresa al interior del manómetro a través de la conexión de acero inoxidable roscada. Luego, pasa al tubo Bourdon, que, por lo general, es un tubo de sección transversal elíptica en forma de "C", el cual se encuentra sellado en uno de sus extremos. Allí se produce una deformación elástica, que es transmitida a través de un mecanismo que se encuentra unido al tubo Bourdon, el cual amplifica la deformación y la convierte en un movimiento angular, el cual hace que se desplace la aguja sobre una carátula graduada con valores en unidades de presión (figura 1).

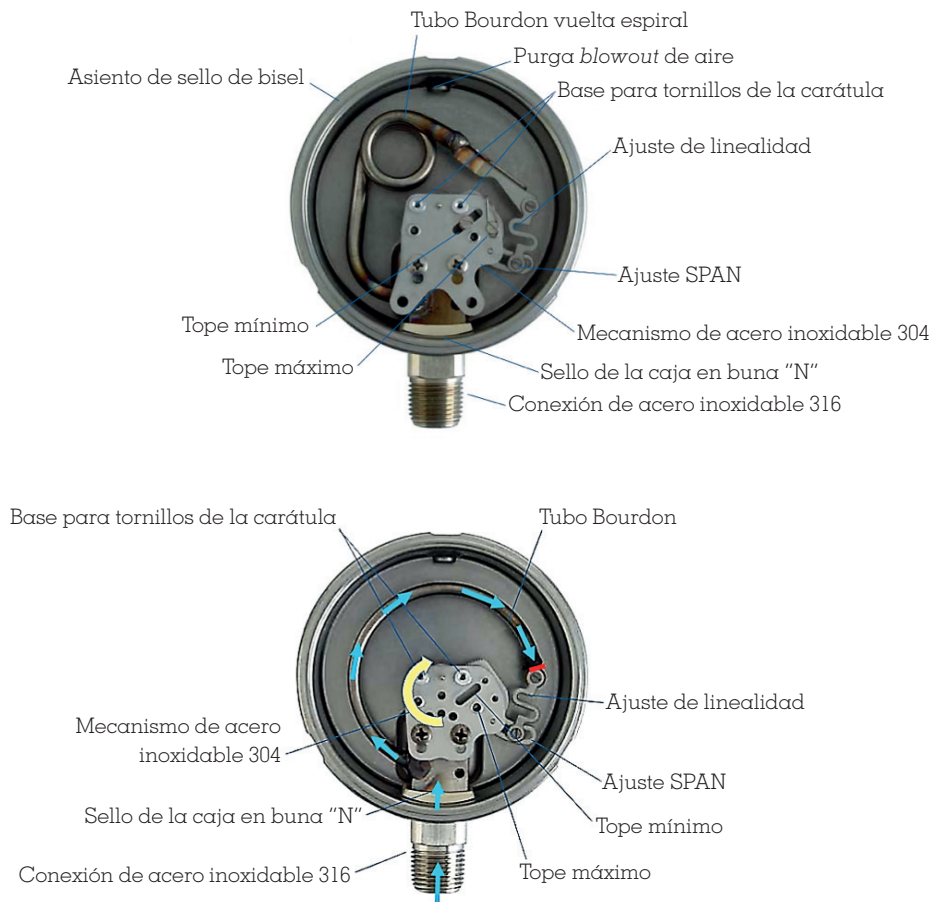


Figura 1. Partes de un manómetro tipo Bourdon.
Fuente: <https://goo.gl/qB7tQC>.

Existen diferentes tipos de manómetros con mecanismo de tubo Bourdon; entre ellos, el más utilizado es el que se construye en forma de "c", usado para presiones inferiores a 1000 psi. Para presiones superiores, se utilizan tubos helicoidales o espirales, todos con el mismo principio de funcionamiento. Según el proceso o aplicación, algunos manómetros presentan en su interior un llenado adicional de glicerina, que tiene como función amortiguar las vibraciones debidas al sistema o al medio donde se emplea el instrumento para garantizar la confiabilidad y legibilidad de las

mediciones. También funciona como lubricante del mecanismo interno, pues minimiza el desgaste y prolonga la vida útil del mismo.

Pero ¿cómo saber que los datos que reporta el manómetro son confiables para su proceso? Para saberlo, es necesario que, en todos los procesos críticos donde se empleen instrumentos de medición, estos se encuentren calibrados. Este artículo muestra de manera sistemática los pasos a seguir para realizar la calibración de un manómetro analógico tipo Bourdon, en un rango de 0 a 30 000 psi, con exactitud de 1,5 % del total de la escala.

2. Materiales y métodos

El método empleado es el de *comparación directa*: se usó como instrumento patrón un manómetro digital de rango de 0 psi a 36 000 psi, con una clase de exactitud de 0,1%, el cual se encuentra calibrado y es trazable al Sistema Internacional de Unidades. Este fue calibrado por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial —Cidesi— ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, México. Como medio generador se empleó un banco generador de alta presión y aceite mineral hidráulico como fluido.

Previo a la calibración se verificó el estado del instrumento bajo prueba. Para el caso del manómetro analógico, se identificó que el funcionamiento y el estado de la aguja indicadora se encuentran en óptimas condiciones; mientras que las escalas de medida en la caratula son legibles. Para el caso del manómetro patrón digital, la pantalla led y la indicación muestran los dígitos correctamente. En los dos casos, se verificaron las conexiones inferiores y los hilos de las roscas, las cuales se encuentran en óptimas condiciones de uso (figura 2).



Figura 2. Manómetro analógico (IBC). Manómetro de referencia o manómetro patrón
Fuente: elaboración propia con autorización de Calibration Service S. A. S.

Se comprobó la estabilidad de las condiciones de temperatura y humedad, mediante un termohigrómetro calibrado por Calibra-

tion Service S. A. S. Se midieron las variaciones térmicas, las cuales no varían ± 1 °C durante todo el proceso de calibración.

Se realiza el montaje del manómetro patrón y del manómetro analógico (instrumento bajo calibración o IBC). En el banco generador hidráulico, se purga el sistema de tal forma que no queden burbujas de aire en el mismo. Se dejan en esta posición durante un periodo de, al menos, una hora, para estabilizar y acondicionar los instrumentos. En la figura 3, se observa el montaje de los manómetros en el banco generador de presión.

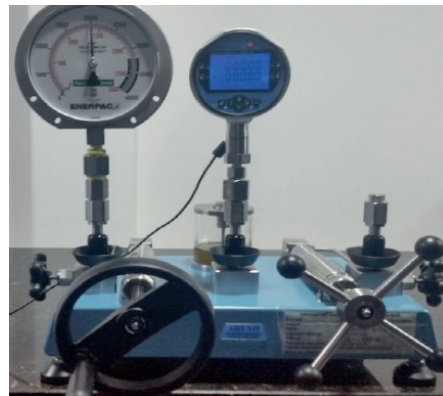


Figura 3. Montaje de los manómetros en el banco generador de presión y purga del sistema.
Fuente: imagen tomada en el laboratorio de metrología Calibration Service S. A. S.

La calibración se realiza *por comparación directa*. Se realizan tres preargas en el 20%, 60% y 100% del intervalo de calibración, con el fin de desprezar el instrumento bajo calibración, teniendo en cuenta que el conjunto interno del manómetro analógico funciona de manera mecánica. Asimismo, se busca estabilizar y acondicionar el conjunto de medición.

Una vez realizado lo anterior se genera presión dividiendo el intervalo de medición en diferentes puntos equidistantes, distribuidos dentro del intervalo de calibración. Cada punto es medido en ascenso y descenso en dos ci-

culos y es comparado con las indicaciones del instrumento patrón. Este método se encuentra

documentado en el procedimiento del Centro Español de Metrología (CEM) (figura 4).

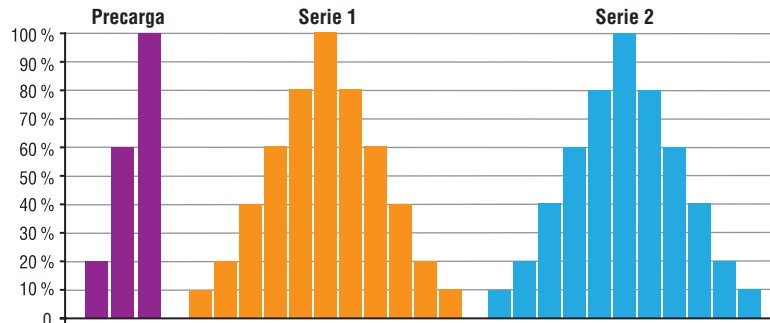


Figura 4. De izquierda a derecha: precargas que se realizan previo a la calibración y secuencia de mediciones distribuidas en el intervalo de calibración.

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

A continuación, en la tabla 1 se muestran los datos del instrumento empleado como patrón de referencia para la calibración.

Tabla 1. Datos del manómetro como patrón utilizado en la calibración

Datos del patrón	
Patrón utilizado	manómetro digital
Marca	Additel
Modelo	ADT672
Capacidad (psi)	36 000
Certificado n.º	LPR-150666
Fecha calibración	Junio 23 de 2015
Próxima calibración	Junio de 2017
Serie interna	CS MP-012/27312420004
Incertidumbre (psi) ±	36
Deriva (psi)	6,6
Resolución (psi)	1

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

3. Toma de datos

Se registran los valores obtenidos de las precargas realizadas en la tabla 2.

Tabla 2. Precargas realizadas al sistema

Valor nominal (psi)	Lectura (psi)
6000	6050
18000	18050
30000	30100

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

En la tabla 3 se reportan las condiciones ambientales mínimas y máximas mediante los registros de temperatura y humedad que emite el termohigrómetro cada cinco minutos. Se evidencia que la variación máxima de la temperatura y la humedad relativa durante la calibración fue de 0,4 °C y 1,0 % HR.

Se realiza la toma de datos en diferentes puntos equidistantes, distribuidos en el rango total del instrumento. En este caso, el rango máximo de calibración es de 30 000 psi.

Tabla 3. Registro de condiciones ambientales mínimas y máximas

	Condiciones ambientales máximas	Condiciones ambientales mínimas	Variación
Temperatura (°C)	20,8	Temperatura :	21,2 0,4 °C
Humedad (%HR)	55	Humedad :	54 1,0%HR

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

Tabla 4. Registro de lecturas tomadas en la calibración según las secuencia de mediciones

Lectura patrón (%)	Lectura patrón (psi)	Serie 1		Serie 2		Promedio (psi)
		Lectura ascenso (psi)	Lectura descenso (psi)	Lectura ascenso (psi)	Lectura descenso (psi)	
0	0	0	0	0	0	0
10	3000	3050	3050	3000	3050	3038
30	9000	9050	9100	9000	9100	9063
60	18000	18100	18150	18050	18100	18100
80	24000	24050	24100	24050	24050	24063
100	30000	30100	30100	30050	30000	30063

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

En la tabla 5 se registra el error para cada una de las lecturas obtenidas en los ciclos de medición.

Tabla 5. Errores obtenidos para cada ciclo de medición

Lectura patrón (%)	Error ascenso 1 (psi)	Error descenso 1 (psi)	Error ascenso 2 (psi)	Error descenso 2 (psi)	Error promedio (psi)	Error promedio (% ET)
0	0	0	0	0	0	0,00%
3000	50	50	0	50	38	0,13%
9000	50	100	0	100	63	0,21%
18000	100	150	50	100	100	0,33%
24000	50	100	50	50	63	0,21%
30000	100	100	50	0	63	0,21%

% E.T.: porcentaje de escala total.

Fuente: Calibration Service S.A.S. certificado de calibración, con fines académicos sin ánimo de lucro.

En la figura 5, se observa la desviación obtenidas en la calibración para cada serie de medición versus la presión generada en unidades de psi, medición.

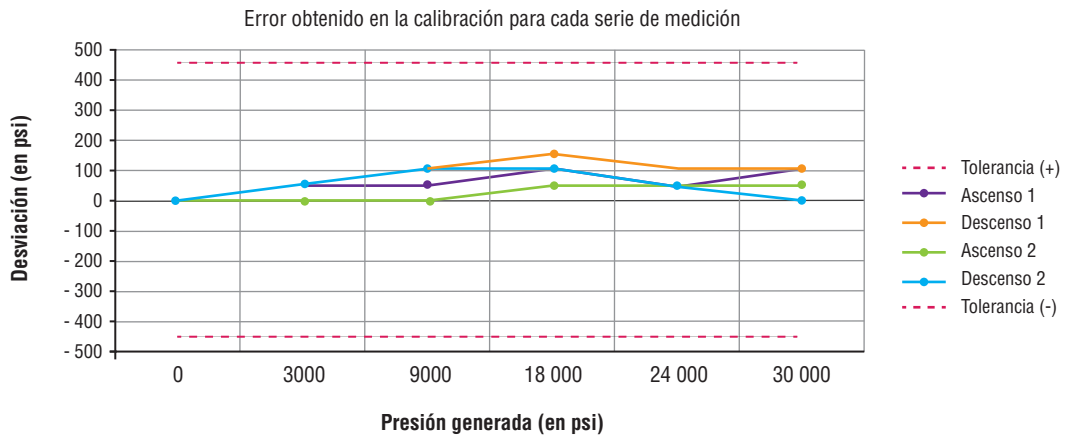


Figura 5. Error obtenido en la calibración para cada serie de medición. Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

Se realizan los cálculos correspondientes al promedio, el error promedio, la desviación estándar, la histéresis, y se tiene en cuenta el error máximo permisible, de acuerdo con el fabricante del IBC y se registran en la tabla 6.

Tabla 6. Registro de cálculos de promedio, error promedio, desviación estándar, histéresis y error máximo permisible

Promedio (psi)	Error promedio (psi)	Desviación estándar (psi)	Histéresis (psi)	Error máximo permisible (psi)
0	0	0	0	450
3038	38	25	25	450
9063	63	48	75	450
18100	100	41	50	450
24063	63	25	25	450
30063	63	48	25	450

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

La incertidumbre reportada fue estimada de acuerdo con la *Guía para la estimación de la incertidumbre de medida* (GUM) de Wolfgang, Schmid y Lazos (2000) y se estimó teniendo en cuenta las contribuciones debidas al instrumento patrón, la resolución, la histéresis

y la dispersión de los datos del instrumento bajo calibración. La incertidumbre expandida se obtiene a partir de la incertidumbre estándar combinada, multiplicada por un factor de cobertura k . Este factor de cobertura corresponde a un nivel de confianza aproximado al

95,45% y su valor depende de la distribución de probabilidad de la incertidumbre estándar

dominante. En la tabla 7, se registran los resultados obtenidos de la calibración.

Tabla 7. Resultado final obtenido de la calibración

Lectura patrón (%)	Lectura patrón (psi)	Lectura promedio (psi)	Error promedio (psi)	Factor de cobertura (psi)	U expandida (psi)	U expandida (psi)
0	0	0	0	2,01	51	0,17
10	3000	3038	40	2,05	62	0,21
30	9000	9063	60	2,16	93	0,31
60	18 000	18 100	100	2,15	81	0,27
80	24 000	24 063	60	2,05	62	0,21
100	30 000	30 063	60	2,28	87	0,29

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

En la figura 6, se observa el error con las barras correspondientes a \pm la incertidumbre versus la presión generada; además, se grafi-

can los límites de error máximo y error mínimo permisible emitidos por el fabricante del IBC.

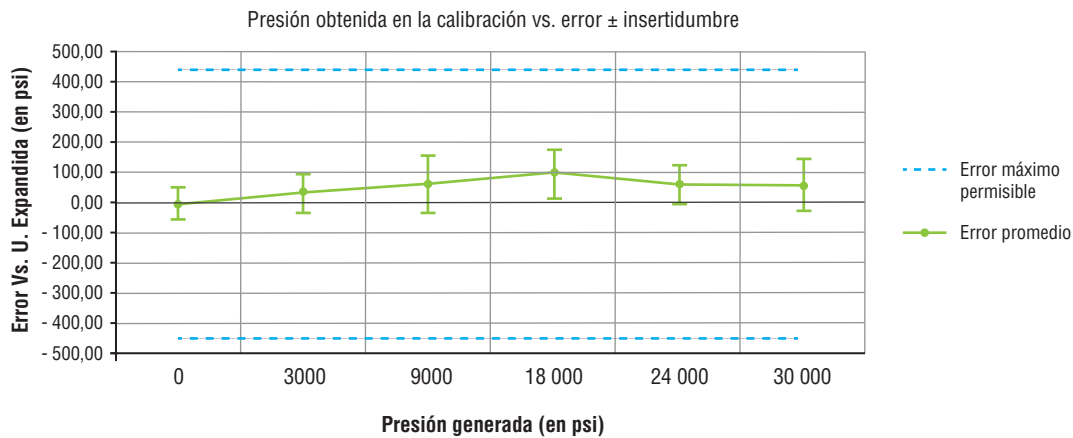


Figura 6. Error \pm incertidumbre versus presión generada.

Fuente: certificado de calibración expedido por Calibration Service S. A. S.

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC ISO/IEC 17025, “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, se expresan los resultados en la

tabla 8 con base en el Sistema Internacional de Unidades (SI), utilizando como factor de conversión a SI: $kPa = psi \times 6,89476$.

Tabla 8. Resultados expresados en el Sistema Internacional de Unidades

Lectura patrón (kPa)	Lectura Promedio (kPa)	Error Promedio (kPa)	U Expandida (kPa)
0	0,0	0	350
20684	20942,8	260	424
62053	62483,7	430	644
124106	124795,1	690	555
165474	165905,1	430	424
206843	207273,6	430	601

Fuente: elaboración propia con base en el Sistema Internacional de Unidades.

En Colombia, el Congreso de la República aprobó desde 1967 nuestro ingreso como miembro pleno a la Convención del Metro, convirtiéndose en el país firmante número 84, mediante el Decreto 1731 del 28 de septiembre, por el cual adoptamos legalmente el SI, ratificado por el Decreto 3464 de 1980, hasta la expedición de la Ley 1512 de 2012 (6 de febrero).

El artículo 68 del Estatuto del Consumidor (Ley 1480 de 2011) estableció como unidades legales de medida aceptadas en el territorio nacional las siguientes:

- Las unidades del SI, adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas de la BIPM y recomendadas por la Organización Internacional de Metrología Legal –OIML–.
- Los múltiplos y submúltiplos del SI y su notación, los cuales deben cumplir con las recomendaciones de la Convención del Metro y los Organismos Internacionales de Normalización.
- Las unidades usadas para cantidades que no están cubiertas por el SI, establecidas por la Superintendencia de Industria y Comercio, basadas preferentemente en normas técnicas internacionales.
- Las unidades acostumbradas establecidas por la Superintendencia de Industria y Comercio.

4. Conclusiones

Se evidenció que el error máximo obtenido en el proceso de calibración fue de $690 \text{ kPa} \pm 555 \text{ kPa}$, ($100 \text{ psi} \pm 81 \text{ psi}$), que equivale al $0,6\% \pm 0,27\%$ de la escala total. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el equipo tiene un error máximo permisible de $\pm 1,5\%$. La escala total del instrumento bajo calibración corresponde a $3102,64 \text{ kPa}$ (450 psi); por lo que se concluye que el instrumento (IBC) se encuentra dentro de parámetros establecidos por el fabricante.

Se realiza la calibración del instrumento en psi, unidad del sistema inglés, teniendo en cuenta que corresponde a la escala principal del manómetro. Sin embargo, según la Norma Técnica Colombiana *NTC ISO/IEC 17025:2005* “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, se deben expresar los resultados de la calibración trazables al SI. Durante el tratamiento de los datos no

se realizan aproximaciones, únicamente hasta el resultado final y utilizando las reglas de redondeo.

Para poder controlar de una manera eficaz los procesos en los cuales intervienen instrumentos de medición, es importante contar con un programa de aseguramiento metrológico que incluya calibraciones periódicas para todos los instrumentos de medición utilizados, con el fin de evidenciar la conformidad de un producto y, a su vez, prevenir siniestros y/o anomalías.

Los intervalos de calibración deben ser determinados de acuerdo con procedimientos de control establecidos por el usuario, teniendo en cuenta los diferentes factores que puedan afectar sus procesos, como lo son los de operación, exactitud requerida, frecuencia de uso, condiciones ambientales, condiciones de almacenamiento, entre otros. Una nueva calibración se deberá llevar a cabo cuando el instrumento sea sometido a sobrecargas, golpes, reparaciones, ajustes, independientemente del tiempo transcurrido desde la última calibración.

Agradecimientos

Los autores reconocen y agradecen de manera especial a todos los funcionarios de la

empresa Calibration Service S. A. S., en especial los ingenieros Jonatan Buitrago, Alejandro Robles, Óscar Gil por su disposición, asesoría y apoyo incondicional para el desarrollo de este artículo. Al personal del Centro Nacional de Metrología (Cenam) por su orientación, capacitaciones, dedicación y hospitalidad. Al ingeniero Alejandro Muñoz Rodríguez, docente de la Universidad Central por todo su apoyo, acompañamiento y aportes para el desarrollo de este artículo.

Referencias

- De Wit México (s.f.). *Lista de partes de manómetros de seguridad*. Consultado en <https://goo.gl/qB7tQC>.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2005). *Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 (primera actualización)*. Consultado en <https://goo.gl/d8Tx77>.
- Reif-Acherman, S. y Machuca-Martínez, F. (2010). Eugène Bourdon y la evolución del manómetro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32 (1), 1601-1-1601-9. doi:10.1590/S1806-11172010000100020.
- Wolfgang, S. y Lazos, R. (2000). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. Consultado en <https://goo.gl/9dVjQn>.