

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO
PARA LA CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS DE TUBO
BOURDON BAJO LOS LINEAMIENTOS DE LA
DIRECTRIZ DKD-R 6-1

Mario Andrés Pantoja Cárdenas

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física
San Juan de Pasto
2019

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO
PARA LA CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS DE TUBO
BOURDON BAJO LOS LINEAMIENTOS DE LA
DIRECTRIZ DKD-R 6-1

Mario Andrés Pantoja Cárdenas

Trabajo de grado para optar por el título de Físico

Directora:
María Fernanda Acosta Mora
BSc en Física

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física
San Juan de Pasto
2019

Nota de Responsabilidad

Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación

María Fernanda Acosta Mora

Directora

Jaime Alfredo Betancourt Miganquer

Jurado

James Perengüez Lopez

Jurado

San Juan de Pasto, 29 de Octubre de 2019

Agradecimientos

Agradezco primero que todo a Dios, mi familia, profesores y amigos por haberme brindado su apoyo para lograr la realización de este trabajo y de cada uno de mis sueños que con él empiezan a florecer.

Resumen

Con este trabajo se busca implementar la Directriz DKD-R 6-1 (Calibración de instrumentos medidores de presión) de autoría del servicio Alemán de Calibración (DKD), que consiste en una norma internacional de calibración enfocada exclusivamente a instrumentos medidores de presión en el laboratorio de metrología de Precisión Biomédica SAS, empresa dedicada a brindar el servicio de verificación metrológica a entidades de salud de Nariño. Se pretende aplicar el proceso de calibración enfocado a manómetros de tubo Bourdon descrito en dicha directriz, analizando los accesorios y condiciones necesarias para obtener buenos resultados como también los equipos patrón a utilizar y de esta manera poder estimar la incertidumbre obtenida en dicho proceso. Se realizará una comparación de los resultados obtenidos con aquellos reportados por un laboratorio que utilizando el mismo método, esté acreditado bajo el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Palabras clave: Calibración, incertidumbre, error de medida, patrón de referencia, grados de libertad.

Abstract

This work seeks to implement Guideline DKD-R 6-1 (Calibration of pressure measuring instruments) authored by the German Calibration Service (DKD), which consists of an international calibration standard focused exclusively on pressure measuring instruments in the metrology laboratory Precisión Biomédica SAS company dedicated to provide the service of metrological verification to health entities of Nariño. The aim is to apply the calibration process focused on Bourdon tube manometers described in this guideline, thus defining the measurement and calibration capacity of the laboratory (CMC) as well as the standard equipment to be used and in this way to be able to estimate the minimum uncertainty obtained in said process. A comparison of the results obtained will be made with those reported by a laboratory that, using the same method, is accredited under the National Accreditation Body of Colombia (ONAC).

Keywords: Calibration, uncertainty, measurement error, reference pattern, degrees of freedom.

Contenido

1	Introducción	13
2	Definición del Problema	15
2.1	Planteamiento del problema	15
2.2	Formulación del Problema	15
2.3	Objetivos	15
2.3.1	Objetivo general	15
2.3.2	Objetivos específicos	16
2.4	Justificación	17
3	Marco Teórico	18
3.1	Definición de Presión	18
3.1.1	Presión atmosférica	19
3.1.2	Presión Absoluta	19
3.1.3	Presión manométrica	19
3.2	Unidades de medida de Presión	20
3.3	Instrumentos para la medida de la presión	22
3.3.1	Manómetro de Bourdon	24
3.4	Conceptos fundamentales del Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)	26
3.5	Estimación de Incertidumbres	39
3.5.1	Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida	39
3.5.2	Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida	42
3.5.3	Factor de cobertura k y grados de libertad	43
4	METODOLOGÍA	47
4.1	Objetivo y alcance	47
4.2	Definiciones	48
4.3	Variables	49
4.4	Equipo involucrado	49
4.5	Procedimiento	51
4.6	Condiciones de seguridad	51
4.7	Procedimiento de calibración	51
4.8	Observaciones	53
4.9	Formato de Calibración de Manómetros de Bourdon	54
4.9.1	Formato de Calibración	54
4.10	PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS DE TUBO BOURDON	58
4.11	Hoja de cálculo para el tratamiento de datos	63
4.11.1	Hoja de cálculo de Excel	63

5	Datos y Resultados	66
5.1	Cálculos matemáticos y estadísticos asociados a la incertidumbre de medida .	69
6	Análisis y conclusiones	88
6.1	Análisis de resultados:	88
6.2	Conclusiones:	90
A	Apéndice I	92
	Bibliografía	101

Lista de figuras

3.1	Partes de un manómetro de Bourdon. (Tomado de: Martínez, V. y Michilena E. (2015)). [3]	25
3.2	Distribución Normal. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]	36
3.3	Distribución rectangular. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]	37
3.4	Distribución triangular. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]	38
3.5	Distribución tipo U. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]	39
4.1	Montaje para la toma de datos. (Fuente: esta investigación.)	50
4.2	Hoja para el manejo de datos en Excel.(Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016)	64
4.3	Hoja de cálculo de error y manejo de incertidumbres. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016)	64
5.1	Hoja de cálculo en Excel para el tratamiento de las incertidumbres. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016.)	78
5.2	Error de medida vs presión promedio de los datos. (Fuente:esta investigación. Software: Excel 2016.	79
5.3	Resultados Error vs. Presión por laboratorio acreditado. (Fuente: laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.; software: Excel 2016.	86
5.4	Superposición de resultados de calibración en este trabajo y los obtenidos por laboratorio acreditado. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016. . .	87
A.1	Indicación digital y análoga para el primer punto de calibración 10 psi. (Fuente: esta investigación.)	93
A.2	Indicación análoga y digital para el segundo punto de calibración 40 psi. (Fuente: esta investigación.)	94
A.3	Indicación digital y análoga para el tercer punto de calibración 80 psi. (Fuente: esta investigación.)	95
A.4	Indicación digital y análoga para el cuarto punto de calibración 120 psi. (Fuente: esta investigación.)	96

Lista de tablas

3.1	Unidades básicas del SI. (Tomado de: Vocabulario internacional de Metrología- Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (2012)) [2]. . . .	29
3.2	Valores del factor de cobertura para distintos niveles de confianza. (Tomado de: Taylor, B.;Kuyadhht, C. (1994)). [9]	45
4.1	Información del equipo de prueba, datos del cliente, lugar y fecha de cali- bración. (Fuente: esta investigación.)	54
4.2	Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)	54
4.3	Formato para consignar las mediciones correspondientes a cada lectura por punto de referencia. (Fuente: esta investigación.)	55
4.4	Condiciones ambientales finales. (Fuente: esta investigación.)	55
4.5	Registro del equipo e información de solicitud por cliente. (Fuente: esta investigación.)	56
4.6	Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)	56
4.7	Datos para Puntos de calibración de solicitud por cliente. (Fuente: esta in- vestigación.)	57
4.8	Condiciones ambientales finales. (Fuente: esta investigación.)	57
4.9	Primera y segunda diferencia de datos de medida para el cálculo de incer- tumbre por histéresis. (Fuente: esta investigación.)	62
5.1	Datos del instrumento bajo prueba concernientes a marca, modelo y escala de medida. (Fuente: esta investigación.)	66
5.2	Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)	67
5.3	Resultados del ensayo 1. (Fuente: esta investigación.)	67
5.4	Resultados del ensayo 2. (Fuente: esta investigación.)	68
5.5	Resultados del ensayo 3. (Fuente: esta investigación.)	68
5.6	Resultados del ensayo 4. (Fuente: esta investigación.)	69
5.7	Condiciones ambientales finales de trabajo. (Fuente: esta investigación.) . . .	69
5.8	Resultados correspondientes al certificado de calibración del Patrón. (Fuente: esta investigación.)	72
5.9	Resultados primera y segunda diferencia para el cálculo de incertidumbre por histéresis para cada uno de los datos de medida. (Fuente: esta investigación.)	73
5.10	Cálculos e Incertidumbres para los datos obtenidos en la medición. (Fuente: esta investigación.)	77
5.11	Número mínimo de puntos de calibración asociados a la exactitud de un manómetro analógico. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]	80
5.12	Error permisible para algunas clases de exactitudes para manómetros Bour- don. (Tomado de: Burns, J.E; Campion, P.J; Williams, A. (1973)). [12]	80

5.13	Condiciones ambientales de trabajo obtenidas por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)	85
5.14	Resultados de medida obtenidos por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)	85
5.15	Diferencia máxima reportada por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)	86
6.1	Comparación de resultados entre laboratorio acreditado y los obtenidos en este trabajo: (Fuente: esta investigación.)	89
A.1	Cotizaciones realizadas en laboratorios acreditados por ONAC para la calibración del equipo de prueba. (Fuente: esta investigación.)	100

Glosario

Incertidumbre de medida: Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

Magnitud: Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

Medición: Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud. La longitud de una barra de acero, la temperatura de un líquido, son ejemplos de magnitudes que pueden ser medidas. En este orden de ideas se tiene que un mensurando que es la cantidad física que se desea medir, requiere del conocimiento de la naturaleza de la magnitud y de la descripción del estado del fenómeno, del cuerpo o de la sustancia de la que la magnitud es una propiedad, incluyendo cualquier constituyente relevante y las entidades químicas involucradas.

Metrología: Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

Procedimiento de medida: Descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida.

Resultado de medida: Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a una medición, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Sistema de magnitudes: Conjunto de magnitudes relacionadas entre sí mediante ecuaciones no contradictorias. Por ejemplo en un sistema de magnitudes que tiene como unidades básicas la longitud, la masa y el tiempo, cuyas dimensiones se designan respectivamente por L, M y T, la dimensión de la fuerza es $L \cdot M \cdot T^{-2}$. El factor que representa una magnitud básica se denomina dimensión de esta magnitud básica.

Unidad de medida: Magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número y una referencia.

Valor medido de una magnitud: Valor de una magnitud que representa un resultado de medida.

Directriz DKD-R 6-1: Documento de aplicación para la calibración de instrumentos medidores de presión, en conformidad con los requisitos de la norma DIN EN ISO/IEC 17025. Esta directriz al igual que todas las directrices describe procesos técnicos, de procedimiento y de organización que sirven a los laboratorios de calibración acreditados como modelo para el establecimiento de procedimientos y reglamentos internos. Las Directrices del DKD pueden formar parte de los manuales de gestión de la calidad de los laboratorios de calibración. La implementación de las directrices garantiza que los dispositivos que han de ser calibrados se traten de forma igual en los distintos laboratorios de calibración y ayuda a mejorar la continuidad y la comparabilidad del trabajo de los laboratorios de calibración.

Captulo 1

Introducción

Las instituciones prestadoras de salud (IPS) en Colombia, están bajo la supervisión de varios entes gubernamentales quienes son los encargados de garantizar que se cumpla con las normas y reglas, tanto de tipo higiénico, tecnológico que garanticen a plenitud la seguridad de los pacientes. Una de las instalaciones a verificación y de suma importancia, es la red de gases medicinales, la cual debe ser diseñada especialmente para el suministro de gases como por ejemplo: Oxígeno, Óxido Nitroso y además vacío medicinal (presión negativa), los cuales son de gran importancia para el tratamiento a base de gases con presión controlada para contribuir a la buena salud de las personas.

Para asegurarse que las mediciones de control de la red de gases medicinales sea apropiada, las entidades prestadoras de salud deben realizar la calibración de cada uno de los manómetros y tomar decisiones con los resultados obtenidos. Para este fin, dichas instituciones deben contratar laboratorios de metrología externos.

Con este trabajo se busca implementar la Directriz DKD-R-6-1 (Servicio Alemán de Calibración (DKD)), que consiste en una norma internacional de calibración aplicada exclusivamente a instrumentos medidores de presión como por ejemplo manómetros de Bourdon, mediante conceptos y lineamientos dados en la misma. Se pretende de esta manera llevar a cabo la aplicación de dicha directriz en el laboratorio de metrología de Precisión Biomédica SAS, con el objetivo de que los resultados obtenidos tras dicho proceso puedan ser comparados con los de un laboratorio acreditado bajo el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), utilizando para ello el mismo método y así poder realizar un estudio detallado de las medidas llevadas a cabo en ambas calibraciones.

En este orden de ideas, lo que desea analizar fundamentalmente es el proceso de calibración de manómetros tubo Bourdon, definiendo los equipos patrón a utilizar y estimar la incer-

tidumbre obtenida en dicho proceso. Dado que son varios factores que se deben tener en cuenta en este trabajo, se puede decir que se trata de un proceso que requiere un adecuado tratamiento de datos teóricos y experimentales.

Captulo 2

Definición del Problema

2.1 Planteamiento del problema

¿Es posible llevar a cabo en el laboratorio Precisión Biomédica S.A.S. la calibración de instrumentos medidores de presión enfocada a manómetros tubo Bourdon bajo la aplicación de la directriz DKD-R 6-1 y así comparar los resultados obtenidos en dicha calibración con los de un laboratorio acreditado por la ONAC y poder tener una cierta estimación del proceso aplicado, considerando las fuentes de incertidumbre implicadas en el problema y sus valores asociados, así mismo como el error de medida y realizar un análisis detallado de estos resultados?.

2.2 Formulación del Problema

¿Es posible obtener resultados confiables en la calibración de manómetros de Bourdon mediante la aplicación del proceso descrito en la directriz DKD-R 6-1 y poder garantizar a las empresas prestadoras de salud medidas de presión aceptables?

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Implementar el proceso de calibración de manómetros de tubo Bourdon bajo los lineamientos de la directriz DKD-R 6-1 en el laboratorio de metrología de Precisión Biomédica.

2.3.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de la directriz DKD-R 6-1, especialmente en los apartados de la misma correspondientes a calibración de manómetros de tubo Bourdon como lo son: todo el contenido del capítulo 3 en donde se explica el concepto de patrón de trabajo, toda la sección del capítulo 4, en donde se pretende dar una breve explicación sobre manómetros análogos, los items 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.7, 5.8 5.9 del capítulo 5, en donde se establecen las condiciones propicias en las que debe encontrarse el equipo de prueba para su calibración, toda la parte del capítulo 6, ya que es aquí donde se describen las condiciones ambientales y su variación máxima permitida, los items 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.6 del capítulo 7, en donde se describen cada uno de los pasos del procedimiento de calibración a seguir, del capítulo 8 el numeral 8.1, en donde se dá el concepto de incertidumbre de medida, los items 8.2.1, 8.2.4 del numeral 8.2, donde se explica sobre la notación de la incertidumbre de medida y finalmente los items 8.3.1, 8.3.2 del numeral 8.3, en donde se muestra el tratamiento matemático y estadístico de incertidumbres. De esta manera se desea abarcar y aplicar cada uno de los conceptos descritos en los numerales e items anteriores y analizar los resultados obtenidos en el proceso.
- Aplicar un procedimiento normativo para la calibración de manómetros de tubo Bourdon incluyendo equipo a utilizar y la estimación de la incertidumbre asociada.
- Efectuar la calibración de un manómetro de tubo Bourdon y comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con aquellos emitidos por un laboratorio acreditado por el ONAC para el mismo equipo.

2.4 Justificación

La calibración de manómetros de Bourdon mediante el proceso utilizado, se realiza por que el hecho de obtener medidas confiables permite prestar un buen servicio a las entidades prestadoras de salud y puede también lograr la acreditación de calidad del laboratorio donde se ha llevado a cabo dicha calibración. Por otro lado la estimación de las incertidumbres asociadas a dichas mediciones permite entender como las fuentes que causan dichas incertidumbres afectan a los datos tomados.

Captulo 3

Marco Teórico

3.1 Definición de Presión

Se define presión como la fuerza por unidad de superficie que ejerce un líquido o un gas perpendicularmente a dicha superficie y el área de esta. Matemáticamente se expresa cómo el cambio de dicha fuerza normal con respecto al área de la siguiente manera [3]:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (3.1)$$

Donde:

- P : Presión ejercida
- F : Fuerza aplicad
- A : Area donde se aplica la fuerza

Más adelante se estudiarán algunas de las unidades en las que se mide la presión.

En el año 1643, el italiano Torricelli tomó un tubo de vidrio de alrededor de 1 m de largo cerrado por un extremo, lo llenó de mercurio, lo tapó con un dedo e invirtiéndolo introdujo el extremo inferior en una cubeta con mercurio, y retiró el dedo cuando el extremo abierto quedó completamente por debajo de la superficie libre del mercurio. Observó entonces que el tubo no quedaba lleno completamente, sino que descendía algo el nivel del mercurio en su interior, manteniéndose a una altura de unos 76 cm sobre el nivel de la cubeta [3].

Torricelli supo dar la verdadera explicación del fenómeno, es decir que la columna de mercurio estaba sostenida por la presión que ejercía la atmósfera sobre la superficie libre del mercurio en la cubeta, y que esta presión era igual al peso que una columna de mercurio de

unos 76 cm de altura ejerce sobre su base [3].

Dependiendo del fenómeno físico en estudio se puede clasificar la presión según su naturaleza como se muestra a continuación:

3.1.1 Presión atmosférica

La presión atmosférica se refiere a un diferencial, una columna imaginaria de aire a la que se le mide su peso en un punto determinado en la superficie terrestre, esto es presión atmosférica básicamente. El cálculo se ejecuta de la siguiente manera: a menor peso de la columna, menor será la presión ejercida y viceversa. Todo dependerá de la cantidad y lo concentrado de las moléculas, también llamada presión barométrica. Es importante tener en cuenta que esta depende de la altitud y es inversamente proporcional a la misma [3].

3.1.2 Presión Absoluta

Es la presión total o real que actúan en el punto de interés del sistema en estudio y que corresponde exactamente a la suma de las dos anteriormente mencionadas como sigue [3]:

$$P_a = P_{\text{atm}} + P_m \quad (3.2)$$

Donde:

- P_m : Presión manométrica
- P_a : Presión absoluta
- P_{atm} : Presión atmosférica

3.1.3 Presión manométrica

Se llama presión manométrica a la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica. Matemáticamente se expresa como:

$$P_m = P_a - P_{\text{atm}} \quad (3.3)$$

3.2 Unidades de medida de Presión

Desde el punto de vista histórico, la primera unidad empleada para medir la presión atmosférica fue el milímetro de mercurio (mm Hg), en razón de la conocida capacidad de una columna de mercurio que es de unos 76 cm, consistente en lograr equilibrar la referida presión. Dicha propiedad era muy utilizada en la construcción de los primeros barómetros, de modo que el mmHg resultaba una unidad de medida sumamente intuitiva [3].

Desde aquel entonces se introdujo por convención una presión a la que se llamó atmósfera que es la que sostiene una columna de mercurio de 76 cm de mercurio (1 atm ; por tanto como la presión es fuerza por unidad de superficie por definición, entonces se tiene que [3]:

$$P = \frac{\text{Peso de la columna de mercurio de 76cm}}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad (3.4)$$

Donde m es la masa de una columna de mercurio de 76cm, g gravedad y S superficie donde se ejerce la presión.

Como la densidad ρ se relaciona con la masa (m) y el volumen (V):

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \cdot V \quad (3.5)$$

Entonces:

$$P = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{V \cdot \rho_{\text{Hg}} \cdot g}{S} \quad (3.6)$$

Ahora como la columna de mercurio corresponde a un cilindro de sección transversal S , entonces el volumen de dicha columna se calcula como:

$$V = S \cdot h \quad (3.7)$$

Donde h es la altura de la columna de mercurio, por lo tanto se tiene:

$$P = \frac{\cancel{S} \cdot h \cdot \rho_{Hg} \cdot g}{\cancel{S}} \quad (3.8)$$

Finalmente se obtiene el siguiente resultado:

$$P = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h \quad (3.9)$$

En el Sistema Internacional de unidades (SI), la presión se expresa en Newton sobre metro cuadrado ($\frac{N}{m^2}$), denominado Pascal (Pa); posteriormente, se generalizó el empleo del sistema CGS, basado en el centímetro, el gramo y el segundo. Por tal motivo, la elección lógica era la baria, correspondiente a una fuerza de una dina actuando sobre una superficie de un centímetro cuadrado. Sin embargo, como la baria resultaba demasiado pequeña para los fines prácticos, se decidió adoptar una unidad un millón de veces mayor: el **bar** (1 bar = 10^6 barias) y en el SI se tiene que 1 Pascal (Pa)=10 barias [4].

Para establecer la equivalencia entre la atmósfera y la unidad de presión en el sistema internacional, tenemos en cuenta que a una latitud de 45° y al nivel del mar la densidad del mercurio es $\rho_{Hg} = 13550 \frac{kg}{m^3}$, la aceleración de la gravedad es $g = 9.806 \frac{m}{s^2}$ y h es la altura de la columna de mercurio que expresada en metros es $h = 0.76m$, se tiene que una atmósfera de presión es [4]:

$$\begin{aligned} P = 1atmosfera(1atm) &= 13550 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.806 \frac{m}{s^2} \cdot h = 0.76m \\ &= 1,013 \cdot 10^5 Pascales(Pa) \end{aligned} \quad (3.10)$$

La altura de dicha columna constituye por tanto una medida de la presión atmosférica, lo mismo podría decirse de una columna de otro líquido, por ejemplo agua. Si Torricelli hubiera realizado la medida de la presión atmosférica con agua hubiese requerido una columna de más de 10 m de longitud [4].

$$P = 1\text{atmósfera}(1\text{atm}) = \rho_{\text{Agua}} \cdot g \cdot h = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot h \quad (3.11)$$

De donde la altura de la columna de agua $h = 10.33\text{m}$, por lo que otra unidad de presión se denomina **m.c.a** (metros de columna de agua).

Se debe mencionar que existen unidades análogas en los países de habla inglesa, donde resultan de uso frecuente las pulgadas de mercurio (inHg) y las libras por pulgada cuadrada (psi) [4]. Estas últimas todavía se utilizan en nuestro país, para medir la presión de los neumáticos en los vehículos, en los compresores y en otros instrumentos de uso cotidiano [4].

3.3 Instrumentos para la medida de la presión

Todo sistema de medición de presión está constituido por un elemento primario, el cual estará en contacto directo o indirecto con el proceso donde ocurren los cambios de presión y por un elemento secundario (el transmisor de presión) que tendrá la tarea de traducir este cambio en valores mensurables para uso en indicación, monitoreo y control [1].

Existen muchas razones por las cuales en un determinado proceso se debe medir la presión. Entre estas se tienen [1]:

- Calidad del producto, la cual frecuentemente depende de ciertas presiones que se deben mantener en un proceso.
- Por seguridad, como por ejemplo, en recipientes presurizados donde la presión no debe exceder un valor máximo dado por las especificaciones del diseño.
- En aplicaciones de medición de nivel.

- En aplicaciones de medición de flujo.

Dentro de los instrumentos de medida, estos se clasifican de varias maneras según la aplicación y el diseño como se muestra a continuación [1]:

1. Instrumentos mecánicos:

Los instrumentos mecánicos más usados son los siguientes:

- Manómetro de Presión Absoluta.
- Manómetro de Tubo en U.
- Manómetro de Pozo.
- Manómetro de Tubo Inclinado.
- Manómetro Tipo Campana.

Dentro de este grupo de instrumentos mecánicos también se encuentran los instrumentos elásticos, que son los que cuentan con un sistema de resortes y engranes para su funcionamiento como son [1]:

- Tubos Bourdon (Manómetro de Bourdon)
- Fuelles
- Diafragmas

2. Instrumentos electromecánicos y electrónicos:

Los instrumentos electromecánicos y electrónicos utilizados para medir presión pueden clasificarse en [1]:

- Medidores de Esfuerzo (Strain Gages)
- Transductores de Presión Resistivos
- Transductores de Presión Capacitivos
- Transductores de Presión Magnéticos
- Transductores de Presión Piezoeléctricos

3.3.1 Manómetro de Bourdon

Uno de los instrumentos que hoy en día es muy usado y está dentro del grupo de los dispositivos mecánicos es el llamado manómetro de Bourdon, el cual en la actualidad tiene un rango amplio de aplicaciones. Sobre su descubrimiento y características principales que conforman su diseño se da una resumida descripción como sigue.

Eugéne Bourdon es el casi desconocido inventor de uno de los instrumentos más conocidos por ingenieros en todo el mundo. El manómetro, o tubo de Bourdon, ha sido el equipo más utilizado para la medición de presión a escalas de laboratorio e industrial 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 paulatino pero firme reemplazo del por ese entonces muy común manómetro de mercurio por un elemento que respondía a la aplicación de un principio físico diferente. Su invención, para nada ajena a las usuales polémicas de prioridad de la época surgidas alrededor de importantes eventos científicos y tecnológicos, permitió subsecuentemente desarrollos en áreas relacionadas de instrumentación y control de procesos [5].

En Junio 18 de 1849 el Ministerio de Agricultura y Comercio del Gobierno Francés le concedió a Bourdon una patente por su trabajo titulado “Un sistema de manómetro sin mercurio denominado manómetro metálico, aplicable a barómetros y manómetros, la cuál le permitía explotar su invención por un periodo de quince años [5].

Partes y funcionamiento del manómetro de Bourdon

Consiste en un tubo aplanado con el que se forma una sección circular de unos 270 ° aproximadamente. En un extremo del tubo se sella y queda libre de sus desplazamientos, mientras al otro extremo se lo fija y está conectado a la cámara o a un conducto en el que la presión se mide [5].

El manómetro de Bourdon se basa en el funcionamiento del tubo de Bourdon. Este es un mecanismo muy simple que consta de un tubo de forma semicircular. Uno de sus extremos está cerrado, mientras que el otro se encuentra conectado a la fuente de presión [5].

Cuando la presión es aplicada por la parte del tubo abierta, este tiende a enderezarse. Este movimiento es transferido a una aguja que se moverá en forma proporcional a la presión dentro del tubo. Se resalta que la aguja se va a situar delante de una plantilla con las indicaciones del valor de la presión según se relacione con la posición que tenga la aguja [5].

La siguiente imagen muestra las componentes interiores de un manómetro Bourdon con sus partes básicas de funcionamiento, así como la visualización de la parte exterior:

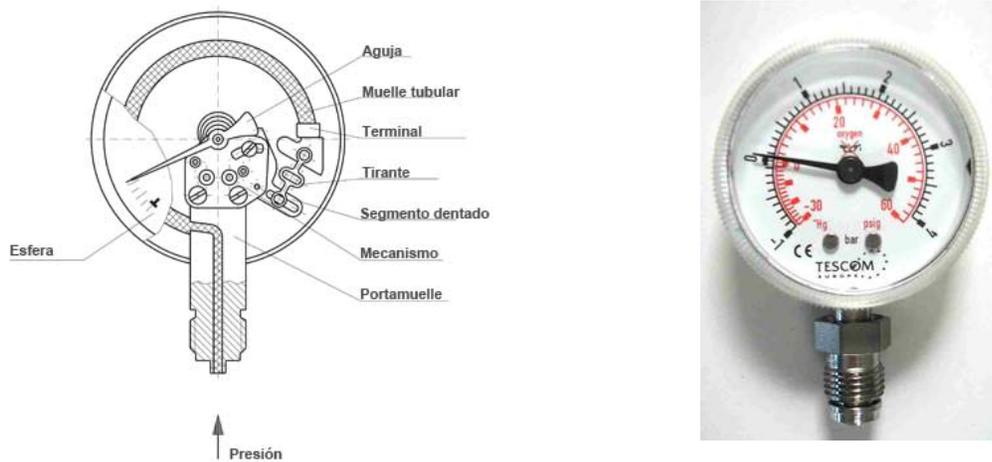


Figura 3.1: Partes de un manómetro de Bourdon. (Tomado de: Martínez, V. y Michilena E. (2015)). [3]

Se describe brevemente la función de cada de las partes del manómetro Bourdon indicadas en la 3.1 como sigue:

- **Aguja:** Indica sobre la escala el valor de la presión.
- **Muelle tubular:** Se estira y se contrae en función de la presión aplicada.
- **Terminal:** Parte final del muelle tubular.
- **Tirante:** Brazo transmisor del movimiento
- **Segmento dentado:** Unión entre el sistema indicador de la aguja y el tirante.
- **Mecanismo:** Traslada el movimiento lineal en uno rotativo.

- **Portamuelle:** Soporte del mecanismo de indicación análogo y el de la entrada de presión.
- **Esfera:** Escala indicadora de rango.

3.4 Conceptos fundamentales del Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)

Las siguientes definiciones son tomadas del Vocabulario Internacional de Metrología [2]:

Metrología

La metrología es la ciencia de las mediciones, toma en cuenta los métodos y los medios usados en todas las actividades de la vida para garantizar la uniformidad y exactitud requeridas en las mediciones realizadas.

La metrología expone la realidad en la que vivimos a través del estudio de las propiedades de la materia, la energía, el tiempo, el espacio y las interacciones entre ellos, expresando las leyes que rigen estos fenómenos con modelos fórmulas matemáticas deducidas a partir de observaciones y medidas realizadas según el método científico.

Magnitud

Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

Naturaleza de una magnitud

Propiedad común a magnitudes mutuamente comparables.

La clasificación de las magnitudes según su naturaleza es en cierta medida arbitraria. Por ejemplo; las magnitudes diámetro, circunferencia y longitud de onda se consideran generalmente magnitudes de una misma naturaleza denominada longitud.

Las magnitudes de la misma naturaleza en un sistema de magnitudes dado tienen la misma

dimensión. Sin embargo, es importante resaltar que magnitudes de la misma dimensión no son necesariamente de la misma naturaleza.

Sistema de magnitudes

Conjunto de magnitudes relacionadas entre sí mediante ecuaciones no contradictorias.

Las magnitudes ordinales, como por ejemplo la dureza Rockwell C, generalmente no se consideran parte de un sistema de magnitudes, porque están enlazadas a otras magnitudes solamente por relaciones empíricas.

Magnitud de base

Magnitud de un subconjunto elegido por convenio, dentro de un sistema de magnitudes dado, de tal manera que ninguna magnitud del subconjunto pueda ser expresada en función de las otras.

El subconjunto mencionado en la definición se denomina “conjunto de magnitudes de base” o “conjunto de magnitudes básicas”.

Las magnitudes básicas se consideran independientes entre sí, dado que una magnitud básica no puede expresarse mediante un producto de potencias de otras magnitudes básicas.

Magnitud de Entrada

Magnitud que contribuye al cálculo de una cantidad física y a su incertidumbre.

Magnitud derivada

Magnitud dentro de un sistema de magnitudes definida en función de las magnitudes de base de ese sistema. Como un ejemplo se tiene que en un sistema de magnitudes que tenga como magnitudes básicas la longitud y la masa, la densidad de masa por unidad de longitud es una magnitud derivada definida como el cociente entre un elemento de masa y un elemento de longitud.

Sistema Internacional de Magnitudes (ISQ)

Sistema de magnitudes basado en las siete magnitudes básicas: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) muy conocido y de bastante campo de aplicación, está basado en el ISQ.

Unidad de medida

Magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número.

Se resalta que para una magnitud dada, el nombre abreviado unidad se combina frecuentemente con el nombre de la magnitud, por ejemplo unidad de masa.

Unidad derivada

Unidad de medida para una magnitud derivada.

Algunos de los ejemplos más comunes encontrados en física son tales como: el metro por segundo, de símbolo m/s , y el centímetro por segundo, de símbolo cm/s , son unidades derivadas de la velocidad en el SI. El kilómetro por hora, de símbolo km/h , es una unidad de velocidad fuera del SI pero cuyo uso es aceptado con el SI. El nudo, igual a una milla marina por hora, es una unidad de velocidad fuera del SI.

Sistema de unidades

Conjunto de unidades de base y unidades derivadas, sus múltiplos y submúltiplos, definidos conforme a reglas dadas, para un sistema de magnitudes dado.

Sistema internacional de Unidades (SI)

Sistema de unidades basado en el Sistema Internacional de Magnitudes, con nombres y símbolos de las unidades, y con una serie de prefijos con sus nombres y símbolos, así como

reglas para su utilización, adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). Es necesario tener en cuenta que el SI está basado en las siete magnitudes básicas del ISQ. Los nombres y símbolos de las unidades básicas se presentan en la tabla.

Tabla 3.1: Unidades básicas del SI. (Tomado de: Vocabulario internacional de Metrología-Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (2012)) [2].

Magnitud Básica	Unidad Básica	
	Nombre	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Corriente Eléctrica	Ampére	A
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Cantidad de Sustancia	mol	mol
Intensidad Luminosa	candela	cd

Valor de una magnitud

Conjunto formado por un número y una referencia, que constituye la expresión cuantitativa de una magnitud, por ejemplo: la longitud de una varilla determinada 5,34 m o 534 cm, masa de un cuerpo determinado 0,152 kg o 152 g. El valor de una magnitud puede ser también expresado en un número complejo, tal es el caso de la impedancia que es una medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión.

Medición

Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud. Las mediciones no son de aplicación a las propiedades cualitativas. Una medición supone una comparación de magnitudes, una descripción de la magnitud compatible con el uso previsto de un resultado de medida, un procedimiento de medida

y un sistema de medida calibrado conforme a un procedimiento de medida especificado incluyendo las condiciones de medida.

Mensurando

Magnitud que se desea o se pretende medir.

La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia cuya magnitud es una propiedad, incluyendo las componentes pertinentes y las entidades químicas involucradas.

Es de importancia saber que la medición, incluyendo el sistema de medida y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal forma que la magnitud bajo medición difiriera del mensurando. En este caso sería necesario efectuar la corrección apropiada. Como un ejemplo se tiene el caso en el que la diferencia de potencial entre los terminales de una batería puede disminuir cuando se utiliza un voltímetro con una conductancia interna significativa. La diferencia de potencial en circuito abierto puede calcularse a partir de las resistencias internas de la batería y del voltímetro.

Principio de medida

Fenómeno que sirve como base de una medición, por ejemplo el efecto termoelectrico aplicado a la medición de temperatura.

Método de medida

Descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición. Los métodos de medida pueden clasificarse de varias maneras como: método de sustitución, método diferencial, método de cero.

Procedimiento de medida

Descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida. Un procedimiento de medida se documenta

habitualmente con suficiente detalle para que un operador pueda realizar una medición.

El concepto metrológico que viene a continuación es uno de los más importantes a tener en cuenta, ya que es justo por su aplicación que se puede llevar a cabo lo que se conoce como calibración, que es un proceso en el que la comparación de medidas entre un modelo de referencia y aquel con el que se pretende medir, permite establecer un procedimiento de medida de referencia.

Procedimiento de medida de referencia

Procedimiento de medida aceptado para producir resultados de medida apropiados para su uso previsto, para evaluar la veracidad de los valores medidos obtenidos a partir de otros procedimientos de medida, para magnitudes de la misma naturaleza, en una calibración o en la caracterización de materiales de referencia.

Resultado de medida

Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible. Un resultado de medida contiene generalmente información relevante sobre el conjunto de valores de una magnitud. Algunos de ellos representan el mensurando mejor que otros. Esto puede representarse como una función de densidad de probabilidad (FDP). El resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida. Si la incertidumbre de medida se considera despreciable para un determinado fin, el resultado de medida puede expresarse como un único valor medido de la magnitud. En muchos campos ésta es la forma habitual de expresar el resultado de medida.

Valor verdadero de una magnitud

Valor de una magnitud compatible con la definición de la magnitud. En el enfoque en torno al concepto de error, el valor verdadero de la magnitud se considera único y en la práctica imposible de conocer en la descripción de la medición. El enfoque en torno al concepto de incertidumbre, consiste en reconocer que, debido a la cantidad de detalles incompletos inherentes a la definición de una magnitud, no existe un único valor verdadero compatible

con la definición, sino más bien un conjunto de valores verdaderos compatibles con ella. Sin embargo, este conjunto de valores es, en principio, imposible de conocer en la práctica. Otros planteamientos no contemplan el concepto de valor verdadero de una magnitud y se apoyan en el concepto de compatibilidad metrológica de resultados de medida para evaluar la validez de los resultados de medida.

Exactitud de medida

Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando [11].

El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida. El término exactitud de medida no debe utilizarse en lugar de veracidad de medida, al igual que el término precisión de medida tampoco debe utilizarse en lugar de exactitud de medida, ya que esta última incluye ambos conceptos. La exactitud de medida se interpreta a veces como la proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando.

Veracidad de medida

Proximidad entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia.

Precisión de medida

Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas. Es habitual que la precisión de una medida se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas.

Error de medida

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia. El concepto de error de medida puede emplearse de las siguientes maneras:

1. Cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medida despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error es conocido.
2. Cuando el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error es desconocido. Conviene no confundir el error de medida con un error en la producción o con un error humano.

Error sistemático de medida

Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible. El valor de referencia para un error sistemático es un valor verdadero, un valor medido de un patrón cuya incertidumbre de medida es despreciable, o un valor convencional de una magnitud. El error sistemático y sus causas pueden ser conocidas o no [11]. Para compensar un error sistemático conocido puede aplicarse una corrección. El error sistemático es igual a la diferencia entre el error de medida y el error aleatorio que se define más adelante.

Error aleatorio de medida

Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible. El valor de referencia para un error aleatorio es la media que se obtendría de un número infinito de mediciones repetidas del mismo mensurando. Los errores aleatorios de un conjunto de mediciones repetidas forman una distribución que puede representarse por su esperanza matemática, generalmente nula, y por su varianza. El error aleatorio es igual a la diferencia entre el error de medida y el error sistemático.

Condición de repetibilidad de una medición

Condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo.

Repetibilidad de medida

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

Condición de reproducibilidad de una medición

Condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares. Los diferentes sistemas de medición pueden utilizar diferentes procedimientos de medida. En la práctica, conviene que toda especificación relativa a las condiciones incluya las condiciones que varían y las que no.

Reproducibilidad de medida

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de reproducibilidad.

Incertidumbre de medida

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza. La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la resolución. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada. En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas.

Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Incertidumbre combinada

Corresponde a la contribución de cada una de las incertidumbres para una medición realizada, sin importar el tipo de distribución que obedezcan los datos experimentales estas se combinan combinan en una sola cantidad.

A la incertidumbre de un mensurando generalmente contribuye una serie de fuentes de incertidumbre, que se combinan según la ley de propagación de incertidumbres, obteniendo de esta manera la incertidumbre combinada U_c .

Incertidumbre expandida

Para los casos en el que se necesita un nivel de confianza mayor que el que nos da la incertidumbre combinada, se usa la incertidumbre expandida. Se desea asegurar una mayor calidad Para ello aplicamos un coeficiente k en función del nivel de confianza (%) que deseamos obtener y del origen de los datos. Los casos mas habituales son para una distribución normal de los datos 95% $k = 2$ y para el 99% $k = 3$, 68% para $k = 1$. De esta manera la incertidumbre expandida no es más que el producto de la incertidumbre combinada y el factor de cobertura para un determinado nivel de confianza.

Patrón

Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud para que sirvan de referencia.

Patrón de medida

Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

Distribuciones de probabilidad más frecuentes

Las distribuciones de probabilidad más frecuentes son las siguientes:

- **Distribución Normal:**

Se utiliza cuando se dispone:

(a) De resultados experimentales de observaciones repetidas. La incertidumbre típica para este tipo de distribución está dada por:

$$u(x) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.12)$$

Donde $S(X_i)$ corresponde a la desviación estándar de las observaciones y n a su número.

(b) De un intervalo de confianza ($x = \pm a$) con indicación del nivel de confianza, por ejemplo 95% u otro.

En la figura 3.2 se muestra la gráfica de esta distribución, junto a algunos niveles de confianza de la misma:

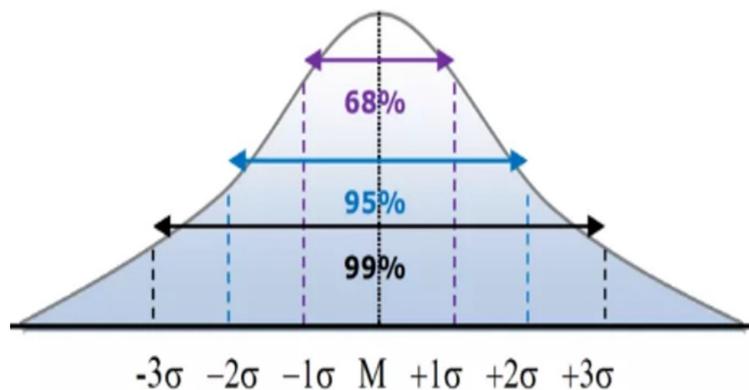


Figura 3.2: Distribución Normal. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]

- **Distribución Rectangular:**

Se utiliza cuando, por ejemplo, se dan límites $\pm a$ sin especificar el nivel de confianza y es esperable que todos los valores sean igualmente probables. La incertidumbre típica está dada por :

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (3.13)$$

Debido a la simetría de la distribución se toma la mitad del intervalo de medida, lo que explica el denominador en la expresión anterior. En La figura 3.3 se muestra su gráfica como sigue :

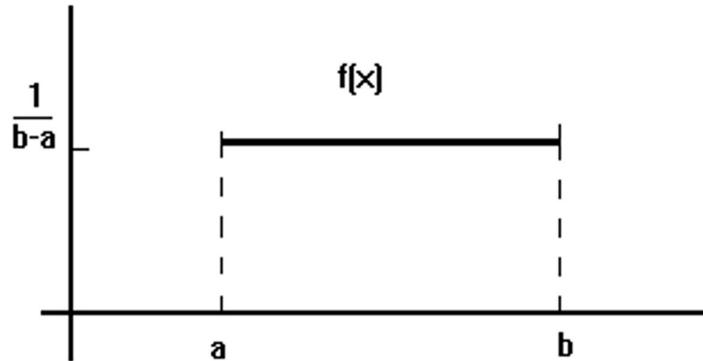


Figura 3.3: Distribución rectangular. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]

Donde se puede apreciar que la probabilidad de las observaciones permanece constante en un determinado intervalo de medida $[a,b]$.

- **Distribución Triangular:**

Se utiliza cuando la información es menos limitada que para una rectangular y se puede suponer que los valores cercanos al valor central son más probables que los valores extremos. Para este caso se tiene que la incertidumbre típica está dada como:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3.14)$$

donde a es el intervalo de confianza tomado en la distribución. En la figura 3.4 se aprecia su gráfica:

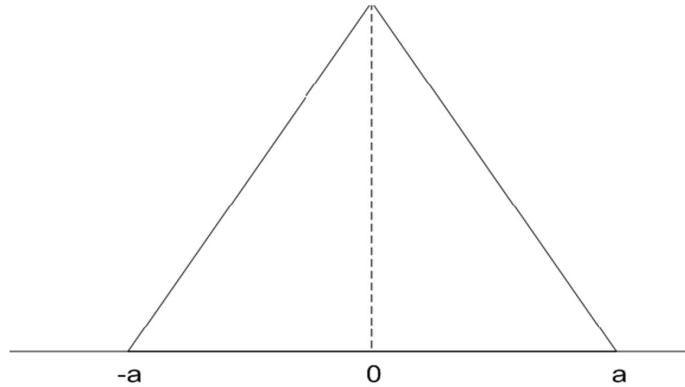


Figura 3.4: Distribución triangular. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]

- **Distribución Tipo U**

Se utiliza cuando se puede suponer que los valores más probables son los situados en los extremos de la distribución. De esta manera la incertidumbre típica se calcula es dada por:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

Se presenta en la figura 3.5 la gráfica que la representa:

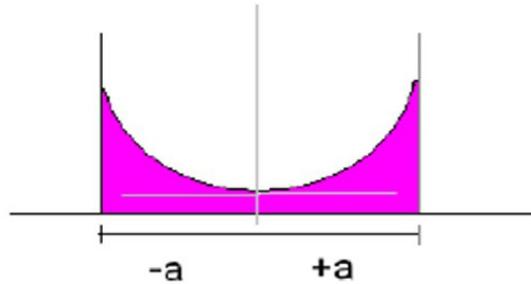


Figura 3.5: Distribución tipo U. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]

Cabe resaltar que dependiendo del tipo de distribución que sigan los datos de una cierta medida, la expresión para la incertidumbre típica tendrá un determinado denominador propio, ya que esto depende en sí de la propia naturaleza de la distribución.

3.5 Estimación de Incertidumbres

3.5.1 Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida

La mejor estimación disponible de la esperanza matemática μ_q de una magnitud q que varía al azar (variable aleatoria), de la que se han obtenido n observaciones independientes q_k en las mismas condiciones de medida es la media aritmética de las n observaciones que viene dada por:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n q_k \quad (3.16)$$

Donde q_k corresponde al k -ésimo dato de una determinada, n al número de datos tomados y \bar{q} es el valor promedio o media aritmética de dichas observaciones. Por otro lado la función que relaciona las magnitudes de entrada generalmente viene dada por:

$$Y = f(X_1, X_2 \dots X_i \dots X_N) \quad (3.17)$$

Donde X_i representa la i -ésima fuente de incertidumbre o magnitud de entrada o de influencia, es decir las cantidades físicas que contribuyen en la incertidumbre de una cierta medida, como por ejemplo la temperatura, el paralaje entre otras.

El índice i hace referencia al número de fuentes de incertidumbres que pueden intervenir en la medición de un mensurando.

Siendo que cada fuente de incertidumbre contribuirá a la estimación de un mensurando específico, se tiene que el valor asociado a dicha fuente de incertidumbre es x_i , es decir se tendría:

$$x_i = \bar{X}_i \quad (3.18)$$

Por lo tanto la función que relaciona los valores asociados a cada fuente de incertidumbre viene dada por:

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_N) \quad (3.19)$$

Los valores de las observaciones individuales q_k difieren en razón de las variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia o de efectos aleatorios.

La varianza experimental de las observaciones que estima la varianza s^2 de la distribución de probabilidad de q , permite entender cuan alejados o cercanos se encuentran los valores obtenidos tras dichas observaciones respecto al valor medio de q y viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (3.20)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada $s(q_k)$ denominada desviación típica experimental y caracterizan la variabilidad o dispersión de los datos q_k alrededor de su media \bar{q} .

La mejor estimación de la varianza experimental, se obtendrá a partir de la varianza experimental de la media, es decir:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3.21)$$

Y la desviación típica experimental será la raíz cuadrada del resultado anterior:

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (3.22)$$

Tanto la varianza experimental de la media, como la desviación típica de la media, cuantifican la bondad con la que \bar{q} estima la esperanza matemática μ_q de q , y una u otra pueden ser usadas como medida de incertidumbre de \bar{q} .

Entonces, se tiene que para una incertidumbre de medida de n observaciones de los datos q , la incertidumbre puede representarse como:

$$s^2(\bar{q}): \text{Varianza experimental de la media}$$

$$s(\bar{q}): \text{Desviación típica experimental de la media}$$

Y matemáticamente se obtiene la incertidumbre típica tipo A asociada a los datos experimentales como sigue:

$$x_i = \bar{X}_i: \text{Estimador de la variable de entrada } x_i$$

$$u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i) = \frac{s^2(X_i)}{n}: \text{Varianza de tipo A}$$

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}}: \text{Incertidumbre típica de tipo A}$$

3.5.2 Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida

Evaluación de una componente de la incertidumbre de medida de manera distinta a una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, como por ejemplo se dan algunas evaluaciones de este tipo:

- Evaluación basada en informaciones asociadas a valores publicados y reconocidos.
- Asociadas al valor de un material de referencia certificado
- Obtenidas a partir de un certificado de calibración
- Obtenidas a partir de la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado;
- Obtenidas a partir de los límites procedentes de la experiencia personal.

Cuando $u^2(x_i)$ o $u(x_i)$, son así evaluadas, se denominan respectivamente varianza de tipo B e incertidumbre típica de tipo B [10].

Algunos ejemplos de evaluación de incertidumbre tipo B son los siguientes:

1. Si la estimación de x_i se obtiene a partir de una especificación del fabricante, de un certificado de calibración, una publicación o de otra fuente y su incertidumbre viene dada como un múltiplo específico de su desviación típica.
2. Determinación tipo B cuando se conoce un único valor de la variable de entrada.
3. Determinación tipo B cuando se supone una distribución de probabilidad para la variable de entrada.

A continuación se dan algunos ejemplos de evaluación tipo B de la incertidumbre para cada uno de los numerales anteriores [10].

1. Determinación tipo B cuando se conoce un único valor de la variable de entrada.
 - Sólo se mide una vez (medida destructiva)
 - El resultado se toma de documentación técnica, por ejemplo un coeficiente de dilatación lineal.

- Resultado facilitado por terceras personas (certificado de calibración)
- Valor del mensurando, el valor único.
- Incertidumbre típica: facilitada por la fuente (documentación o certificado).
- En su defecto, calcular en base a la experiencia.

3.5.3 Factor de cobertura k y grados de libertad

Para los conceptos que siguen en adelante, no se tendrá en cuenta la demostración de los resultados sino más bien su aplicabilidad, esto debido a que sus demostraciones son demasiado extensas y no se pretende hacer un enfoque a fondo sino más bien entender su significado físico.

Factor de cobertura

El factor de cobertura k es un número que refleja los extremos de probabilidad en los que se encuentra el valor medido. Está relacionado con la probabilidad de cobertura y con la distribución estadística del mensurando.

Grados de libertad

Los grados de libertad (GL) son la cantidad de información suministrada por los datos de una medida para estimar los valores de parámetros desconocidos como las incertidumbres por ejemplo de tipo **A** ó **B** y la variabilidad de sus estimaciones. Este valor se determina según el número de observaciones realizadas. Los grados de libertad también se utilizan para caracterizar una distribución específica como por ejemplo la distribución normal ó rectangular.

Dependiendo de la naturaleza de una incertidumbre su estimación de grados de libertad tendrá un tratamiento distinto, por ejemplo si la incertidumbre en estudio se evalúa como tipo A, se tiene que los grados de libertad asociados para dichas incertidumbres bajo una distribución normal son dados por:

$$v_i = n - 1 \tag{3.23}$$

Donde n es el número de observaciones realizadas para un mensurando específico.

Para incertidumbres tipo B los grados de libertad correspondientes para distribuciones no normalizadas como por ejemplo una rectangular, vienen dados por la siguiente expresión:

$$v_i \approx \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta U(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (3.24)$$

Donde U_{x_i} corresponde a la incertidumbre tipo B en tratamiento. Cabe resaltar que el término entre corchetes de la expresión anterior corresponde al nivel de desconfianza para un determinado nivel de confianza, por ejemplo para la distribución normal si se toma un nivel de confianza de 95% entonces el nivel de desconfianza restante corresponderá al 5%.

Grados efectivos de libertad y aproximación de Walche-Satterthwaite

Los grados efectivos de libertad para una medida realizada, corresponden a la contribución de todos los grados de libertad para las incertidumbres en estudio sean tipo A ó B. Se trata de una globalización que cubra todos los grados de libertad del problema en particular.

Para entender y aclarar mejor esta situación, por ejemplo para una combinación de varias distribuciones en un problema en particular, se tiene que los grados efectivos de libertad asociados a incertidumbres A y B son dados por:

$$v_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4}{v_i}} \quad (3.25)$$

Que es conocida como la aproximación de Walche-Satterthwaite, donde U_c es la incertidumbre combinada, U_i son cada una de las incertidumbres tipo A o B implicadas en el problema a tratar y v_i son los grados de libertad asociados a dichas incertidumbres. Esto será útil para

estimar el valor del factor de cobertura para un determinado valor de confianza para las observaciones. En la siguiente tabla se presentan diferentes valores del factor de cobertura para diferentes grados efectivos de libertad:

Tabla 3.2: Valores del factor de cobertura para distintos niveles de confianza. (Tomado de: Taylor, B.;Kuyadhtt, C. (1994)). [9]

Grados de libertad efectivos	Niveles de confianza (%)					
	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,75	3,23
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76

50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Es importante resaltar que para las distribuciones de probabilidad más típicas como la normal el factor de cobertura k tiende a tomar un valor entre 2 y 3 para determinados niveles de confianza.

Captulo 4

METODOLOGÍA

En el presente trabajo se pretende aplicar un procedimiento de calibración enfocado a instrumentos medidores de presión como son manómetros de Bourdon. Se busca realizar mediciones por comparación directa entre un equipo patrón y uno de prueba. De esta manera se desea hacer un énfasis claro y conciso en los apartados de la directriz DKD-R 6-1 relacionados con la calibración de instrumentos analógicos para la medida de presión, utilizando equipos de buena calidad para realizar dichas observaciones como un patrón digital y un manómetro de Bourdon en óptimas condiciones. En dicha directriz se muestra el procedimiento sugerido para llevar a cabo dicha calibración, así como conceptos fundamentales para el mejor entendimiento de la aplicación de cada uno de los apartados mencionados.

Siendo así se busca evaluar los resultados obtenidos en dichas observaciones, así como sus incertidumbres asociadas. Todo esto sera posible tras comparar estos resultados con con los de un laboratorio acreditado que haya aplicado un proceso similar al que se aplica en este trabajo. Como producto de todo lo mencionado anteriormente se tiene el siguiente documento: "procedimiento para calibración de manómetros tipo Bourdon".

4.1 Objetivo y alcance

El objetivo de este documento es realizar el procedimiento para calibración de manómetros de Bourdon de hasta 200 psi siguiendo los lineamientos de la directriz DKD-R 6-1 descritos en el capítulo dos del presente trabajo en la subsección de los objetivos específicos, con el propósito de que en el laboratorio se puedan obtener medidas de presión confiables y de esta manera comparar los resultados con los de un laboratorio acreditado y tener una estimación sobre las incertidumbres obtenidas en el proceso.

4.2 Definiciones

- **PRESIÓN:** Es una magnitud física que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie [1].
- **PRESIÓN MANOMÉTRICA:** Corresponde al valor que se puede leer directamente en un manómetro o en un transmisor de presión. También es denominada presión relativa porque la lectura que hace el manómetro parte de considerar como valor cero la presión atmosférica existente en el lugar de medición. Debido a esto, el valor que se ve en la pantalla o en la esfera del manómetro corresponde a la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica [1].
- **CALIBRACIÓN:** Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de las magnitudes que indique un instrumento de medición o un sistema de medición, o valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes determinados por medio de los patrones [1]
- **MAGNITUD:** Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia [1].
- **MEDICIÓN:** Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud [1]
- **PATRONES DE MEDICIÓN:** Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud que sirva como referencia [1].
- **INCERTIDUMBRE DE MEDIDA:** La incertidumbre de medida es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza [1].

4.3 Variables

- P_m = Presión manométrica a medir.
- P_n = Número de medidas tomadas en total por punto de calibración.
- P_k = Número de puntos de calibración.

4.4 Equipo involucrado

- Manómetro bajo prueba de tipo tubo Bourdon (máximo 200 psi), que es un dispositivo análogo al cual se desea calibrar.
- Analizador de flujo IMT PF-300, que es un dispositivo indicador digital. Para la realización de este trabajo corresponde al equipo patrón y es en donde se toman los datos experimentales.
- Bomba generadora de presión, con la cual se puede manualmente aumentar o disminuir la presión (insuflar).
- Accesorios, conexiones en T que permitan conectar el equipo de prueba al patrón y estos a la bomba generadora de presión.
- Soportes, que permiten ajustar el montaje y cada uno de sus elementos.
- Mangueras de flujo que permitan el paso de aire desde la bomba de presión hacia el equipo de prueba, el patrón y entre estos últimos.

Se muestra continuación en la figura 4.1 el montaje para la toma de datos:

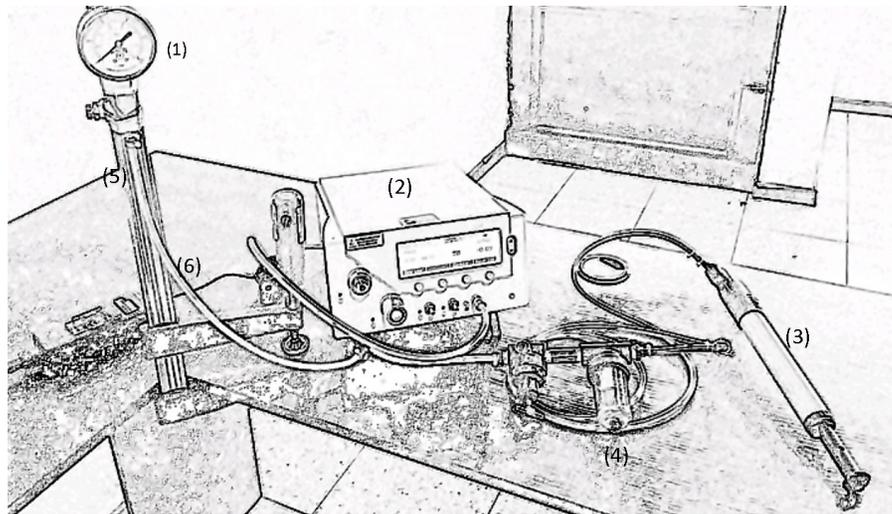


Figura 4.1: Montaje para la toma de datos. (Fuente: esta investigación.)

(1) Manómetro Bourdon de máximo 200 Psi

(2) Equipo patrón Analizador de flujo IMT PF-300

(3) Bomba generadora de presión.

(4) Filtro de aire, conexiones.

(5) Soportes.

(6) Mangueras de flujo de aire.

4.5 Procedimiento

- Realizar una inspección visual para detectar posibles daños (aguja, rosca, superficie de sellado, canal de presión).
- El manómetro bajo prueba debe estar en óptimas condiciones higiénicas para su uso.
- La escala de medida del manómetro de prueba debe ser totalmente legible para las medidas.
- La presentación de los valores mostrados en el display del patrón no deben ser ambiguos.
- Temperatura de trabajo entre 18°C y 28°C.

4.6 Condiciones de seguridad

Se debe tener en cuenta:

- Verificar que las condiciones eléctricas del lugar sean las correctas antes de conectar el equipo patrón a la corriente.
- Verificar que la posición del montaje para la calibración sea la adecuada, asegurándose de que el espacio para trabajar sea el indicado.
- Agarrar bien el montaje en el caso de traslado, con el fin de evitar golpes tanto del equipo como del personal de calibración.
- Mantener de forma ordenada las mangueras, con el fin de evitar algún enredo.

4.7 Procedimiento de calibración

1. Consignar los datos característicos del equipo en el formato correspondiente a identificación del equipo de prueba.

2. Conectar el patrón, el objeto a calibrar y la bomba de presión como se indica en la figura 4.1.
3. Conectar el patrón a la red eléctrica y encenderlo
4. Determinar y consignar las condiciones ambientales iniciales.
5. Verificar que el manómetro de prueba y el patrón indiquen el punto cero de medida.
6. Tomar las medidas directamente desde el patrón digital.
7. Antes de realizar cualquier medida, se deben realizar dos precargas (Insuflar) hasta el valor final del rango de medición con el fin preparar el mecanismo de la aguja del manómetro Bourdon para las medidas posteriores. El tiempo de precarga en el valor más alto así como el tiempo entre dos precargas debe ser igual a 30 segundos.
8. Inmediatamente después de la última precarga, se debe tomar el punto de medida cero como lectura para verificar que la marcación de este punto sea adecuada y evitar que una posible contribución de presión adicional afecte a las medidas.
9. Se deciden los puntos en los que se realizará la calibración, los cuales deben estar distribuidos entre 0 y 200 psi. Para este trabajo solamente se tomarán 4 puntos específicos, debido a la baja capacidad de la bomba generadora de presión pero dependiendo de la capacidad de la bomba generadora de presión y del equipo en sí con el que se cuente se pueden tomar más o menos puntos de calibración.
10. Realizar tres medidas, iniciando por una de manera ascendente en donde se empieza a medir desde el valor más bajo de medida hasta el mas alto, luego una descendente desde el valor más alto hasta el más bajo y por último nuevamente ascendente como la primera.
11. Las lecturas deben ser tales que el tiempo de espera entre dos de ellas debe ser 30 segundos contados desde que empieza a cambiar la aguja hasta el próximo valor, esto con el objetivo de esperar a que se logre una estabilidad lo suficientemente adecuada y así poder tomar una medida estable. De ser necesario se dan ligeros golpes al manómetro de prueba para disminuir la fricción en la aguja. El tiempo de espera en el último valor

del rango de medida debe ser de 5 minutos, después del cual se debe volver a tomar este valor y seguir con la medición correspondiente.

12. Una vez obtenidos los datos de medida, deben registrarse en su formato correspondiente de tabla de datos, ordenadamente y totalmente legibles para su posterior análisis.
13. Después de terminar con la serie de mediciones, esperar 30 segundos desde la descarga completa y posteriormente tomar la medida del punto cero nuevamente.
14. Una vez terminado la toma de datos determinar y consignar las condiciones ambientales finales.
15. Apagar el equipo patrón y desconectar todo de manera ordenada.

4.8 Observaciones

Si se registra alguna anomalía en el procedimiento anterior, esta debe consignarse en el formato respectivo.

4.9 Formato de Calibración de Manómetros de Bourdon

A continuación se presentan dos formatos, los cuales fueron elaborados bajo los formatos realizados por el laboratorio en donde se llevó a cabo la calibración Presición Biomédica S.A.S.. En primer lugar uno que corresponde al formato para la calibración llevada a cabo en este trabajo y otro para servicio al cliente, esto debido a que los puntos en donde se llevará el proceso pueden variar de manera que para este trabajo solamente se tomaron 4 puntos y para la calibración por petición del cliente un máximo de 9 puntos en total.

4.9.1 Formato de Calibración

Se muestra en la tabla 4.1 el formato para el registro del equipo, así como los datos correspondientes al cliente, lugar y fecha de calibración.

Tabla 4.1: Información del equipo de prueba, datos del cliente, lugar y fecha de calibración. (Fuente: esta investigación.)

Cliente		Modelo	
Fabricante		Serial	
Ubicación		Fecha de recepción	
Lugar de calibración		Fecha de medición	

Se muestra en la tabla 4.2 el formato para el registro de condiciones ambientales iniciales.

Tabla 4.2: Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES INICIALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %

Se muestra a continuación en la tabla 4.3 la manera como consignar los resultados obtenidos para cada medida correspondiente a cada uno de los puntos en los que se hará la calibración.

Tabla 4.3: Formato para consignar las mediciones correspondientes a cada lectura por punto de referencia. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi)
1	P_1			
2	P_2			
3	P_3			
4	P_4			

Se registran de igual manera las condiciones ambientales finales como se indica en la tabla :

Tabla 4.4: Condiciones ambientales finales. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES FINALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %

OBSERVACIONES

Se anexa el formato de calibración de petición por cliente. La tabla 4.5 muestra la información correspondiente al equipo de prueba, lugar donde se llevará a cabo el trabajo solicitado, fecha y puntos a calibrar por pedido:

Formato para el registro del equipo:

Tabla 4.5: Registro del equipo e información de solicitud por cliente. (Fuente: esta investigación.)

Cliente		Modelo	
Fabricante		Serial	
Ubicación		Fecha de recepción	
Lugar de calibración		Fecha de medición	
No. de Puntos solicitados		Total puntos de Calibración	

Se toman las condiciones ambientales iniciales en la tabla 4.6:

Tabla 4.6: Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES INICIALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %

Se registra el total de puntos de calibración solicitados por el cliente en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Datos para Puntos de calibración de solicitud por cliente. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi) (Patrón)
1	P_1			
2	P_2			
3	P_3			
4	P_4			
5	P_5			
6	P_6			
7	P_7			
8	P_8			
9	P_9			

De manera similar se registran las condiciones ambientales finales en la tabla 4.8:

Tabla 4.8: Condiciones ambientales finales. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES FINALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %

4.10 PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS DE TUBO BOURDON

En esta sección lo que se pretende es realizar una evaluación clara y detallada sobre la obtención de las incertidumbres implicadas en la calibración, así como también su clasificación según la naturaleza y fuente de donde provengan. Todo esto se realiza con el propósito de apreciar de una manera clara como las posibles contribuciones de las distintas fuentes de incertidumbre pueden afectar o alterar al mensurando obtenido. Se realizan cálculos matemáticos y estadísticos para determinar sus valores numéricos y una hoja de cálculo en Excel para su mejor tratamiento, de esta forma se genera el siguiente documento.

1. OBJETIVO Y ALCANCE

Este documento establece una guía para la identificación de las fuentes y la estimación de la incertidumbre del método utilizado en la calibración de manómetros de Bourdon descrito en la directriz DKD-R 6-1. Aplica para la identificación de las fuentes y la estimación de la incertidumbre del procedimiento desarrollado en el laboratorio.

2. DEFINICIONES

- **Desviación:** Diferencia entre los resultados de los análisis y el valor de referencia aceptado [1].
- **Desviación estándar:** Es la medida de cómo se dispersan los valores alrededor de la media en la distribución de valores, la desviación estándar S que usualmente se analiza es la muestral y no la poblacional [1].
- **Desviación estándar de la repetibilidad:** Es la desviación estándar de los resultados de los análisis obtenidos bajo condiciones de repetibilidad. (ver definición de repetibilidad) [1].

- **Distribución normal:** Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal [6].
- **Distribución rectangular:** En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento [6].
- **Incertidumbre (de medida):** Es el parámetro asociado con el resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que se pueden atribuir razonablemente al mensurando [1].
- **Incertidumbre tipo A:** Estimados de la incertidumbre usando estadística [6].
- **Incertidumbre tipo B:** Estimados de la incertidumbre a partir de otra información. Esta podría ser información de experiencias de mediciones anteriores, certificados de calibración, las especificaciones del fabricante, cálculos, información publicada y sentido común [6].
- **Factor de cobertura:** Suministra un nivel de confianza particular para la incertidumbre expandida [7].
- **Mensurando:** Es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición. En no pocas ocasiones se mide algo distinto al propósito original [1].
- **Presición:** Es la proximidad entre resultados de análisis bajo ciertas condiciones de medida [5].

- **Repetibilidad:** Es la precisión bajo las condiciones de repetibilidad, es decir, condiciones donde los resultados de análisis independientes se obtienen con el mismo método, en ítems de análisis idénticos, en el mismo laboratorio, por el mismo operador y utilizando el mismo equipamiento dentro de intervalos cortos de tiempo [5].

3. Procedimiento

- (a) Consignar los datos de condiciones ambientales y determinar si algunos de los valores se encuentran fuera del rango de trabajo del equipo. El valor de temperatura debe estar entre 18°C y 28°C y el valor de humedad relativa entre 30% y 85%. Si alguno de los valores no cumple con las condiciones la calibración será invalida y deberá volverse a realizar.
- (b) Calcular la media aritmética de los datos obtenidos (o promedio). Se obtiene a partir de la suma de todos sus valores, dividida entre el número de mediciones realizadas y que está dada por:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (4.26)$$

Donde $n = 3$

- (c) Calcular el error de medida E como se muestral a continuación:

$$E = V_p - V_o \quad (4.27)$$

Donde:

- V_p : Es el valor seleccionado en el equipo Patrón
- V_o : Corresponde al valor de la indicación observado en el equipo bajo prueba

- (d) Calcular la desviación estándar s de las n observaciones o muestras de datos obtenida, la cual viene dada por:

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (4.28)$$

Donde:

- q_k : Son las lecturas o datos obtenidos en la medición
- \bar{q} : Es la media aritmética calculada en el inciso b)
- n : Es el número de datos u observaciones por cada punto de calibración, que en este caso es $n = 3$

(e) Calcular la incertidumbre estándar estimada de los datos, considerando que la fuente de incertidumbre para la distribución de los datos es de tipo A:

$$U_s = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (4.29)$$

Donde s es la desviación estándar calculada en el inciso f) y n el número de observaciones que en este caso es 3.

(f) Calcular la incertidumbre debida a la resolución del patrón, asumiendo para ello que la fuente de incertidumbre es de tipo B, utilizamos por lo tanto una distribución rectangular:

$$U_{resol} = \frac{resol}{\sqrt{12}} \quad (4.30)$$

(g) Calcular la incertidumbre asociada a la incertidumbre de calibración del patrón U_{cal} en este caso se asume la máxima incertidumbre reportada en el certificado de calibración del equipo patrón I_{max} , dividida por el factor de cobertura k igualmente reportado en el certificado de calibración como sigue:

$$U_{cal} = \frac{I_{max}}{k} \quad (4.31)$$

(h) Calcular la incertidumbre asociada a la histéresis en las medidas teniendo en cuenta que la fuente de incertidumbre es de tipo B, para ello se se consigna en la tabla 4.9 la primera (Δ_1) y segunda diferencia Δ_2 para los datos correspondientes a cada lectura siguiendo la secuencia o el orden de calibración como se muestra a continuación:

Tabla 4.9: Primera y segunda diferencia de datos de medida para el cálculo de incertidumbre por histéresis. (Fuente: esta investigación.)

Lectura (psi)	Primera diferencia (psi) Δ_1	Segunda diferencia (psi) Δ_2	Diferencia máxima (psi)
P_1			
P_2			
P_3			
P_4			

Se toma la diferencia máxima por punto y se procede a calcular esta incertidumbre:

$$U_{Hist} = \frac{\Delta_{max}}{\sqrt{12}} \quad (4.32)$$

Donde Δ_{max} hace referencia a la diferencia máxima calculada en la tabla 4.9.

- (i) Calcular la incertidumbre estándar combinada. Las incertidumbres individuales calculadas mediante las evaluaciones tipo A y B respectivamente, pueden combinarse de forma válida mediante la sumatoria de cuadratura.

$$U_c = \sqrt{U_s^2 + U_{resol}^2 + U_{cal}^2 + U_{Hist}^2} \quad (4.33)$$

- (j) Calcular el valor del factor de cobertura asociado a los datos experimentales, calculando en primer lugar los grados de libertad y los grados efectivos de libertad.

De esta manera se tiene que los grados de libertad para incertidumbres tipo A están dados por:

$$v_i = n - 1 \quad (4.34)$$

Donde n es el número de lecturas tomadas que en este caso es 3.

Para incertidumbres tipo **B**, los grados de libertad vienen dados por la siguiente aproximación:

$$v_i \approx \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta U(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (4.35)$$

Donde la cantidad entre los corchetes de la expresión anterior representa el valor del nivel de desconfianza para un nivel de confianza tomado.

Los grados efectivos de libertad v_{eff} son dados por la fórmula de aproximación de Welch-Satterthwaite como sigue:

$$v_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4}{v_i}} \quad (4.36)$$

- Donde U_c : Incertidumbre combinada
 - U_i : incertidumbres **A** y **B**
 - v_i : grados de libertad para incertidumbres tipo **A** y **B**
- (k) Calcular la incertidumbre expandida de la medición U , multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura k encontrado en el ítem anterior, teniendo en cuenta que se obtenga un nivel de confianza del 95% para una distribución normal.

$$U = k \cdot U_c \quad (4.37)$$

4.11 Hoja de cálculo para el tratamiento de datos

4.11.1 Hoja de cálculo de Excel

Con el objetivo de hacer más práctico el trabajo realizado se creó tres hojas en un libro de Excel. La primera para la introducción de los datos correspondientes a la medición, el

segundo para el cálculo de error y la estimación de incertidumbres y el último para poder generar el certificado de calibración. Siendo así, se muestra en las figuras 4.2 y 4.3 su formato:

	A	B	C	D	E	F	G	
8	Instrumento	MANÓMETRO BOURDON						
9	Fabricante	WINTERS						
10	Modelo	0 - 200 PSI						
11	Señal							
12	No. Identificación o A/F							
13	Ubicación							
14	Manómetro de	Unidad						
15	Rango de presión	0-200					psi	
16	División de escala						psi	
17	Novedades	Ninguna						
18								
19	Lugar de Calibración	LABORATORIO						
20	Fecha de Recepción							
21	Fecha de Calibración							
22								
23		CONDICIONES AMBIENTALES						
24	Temperatura Inicial	18,2 °C	% de Humedad Rtiva Inicial			62,3		
25	Temperatura Final	18,0 °C	% de Humedad Rtiva Final			61,3		
26		TOMA DE DATOS						
27		I. PRESIÓN						
28	Selección (psi)	10	40	80	120			
29	Indicación 1 (psi)	7,55	38,45	78,17	119,19			
30	Indicación 2 (psi)	8,04	38,70	78,26	119,29			
31	Indicación 3 (psi)	8,06	38,55	78,07	119,17			
32								
33								
34								
35								

Figura 4.2: Hoja para el manejo de datos en Excel.(Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		CONDICIONES AMBIENTALES							
2	Temperatura Promedio:	18,1 °C	Variación de Temperat		-0,2 °C				
3	Humedad promedio:	62	Variación de Humedad		-2				
4		CALCULOS E INCERTIDUMBRES							
5	Indicación	10	40	80	120				
6	Promedio	7,88	38,57	78,17	119,22				
7	Error	2,12	1,43	1,83	0,78				
8	Error %	27,2	3,6	2,3	0,7				
9	Desviación Estándar	0,29	0,13	0,10	0,06				
10	U _a	0,17	0,08	0,06	0,03				
11	Resolucion patrón	0,003	0,003	0,003	0,003				
12	Calibracion patrón	0,02	0,02	0,02	0,02				
13	Inctidumre Histeresis	0,14	0,07	0,05	0,03				
14	Combina Uc	0,22	0,10	0,10	0,06				
15	Factor de Cobertura k	2,45	2,57	2,13	2,04				
16	Expandida U _{exp}	0,54	0,26	0,21	0,12				
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									

Figura 4.3: Hoja de cálculo de error y manejo de incertidumbres. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016)

Una vez realizados todos los documentos descritos anteriores como también la hoja de cálculo en Excel, se procedió a la toma de datos y posteriormente a la búsqueda de un laboratorio acreditado que calibre el equipo bajo prueba. Se muestra en la tabla ?? del apéndice las respectivas cotizaciones.

Captulo 5

Datos y Resultados

Aplicando todo lo descrito en los documentos anteriores, se obtuvieron los datos que se muestran a continuación.

Datos del manómetro de Prueba

Los datos del instrumento de prueba se muestran a continuación en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Datos del instrumento bajo prueba concernientes a marca, modelo y escala de medida. (Fuente: esta investigación.)

Equipo	Manómetro analógico
Marca	WINTERS
No. de serie	890
Clase de exactitud	1,6%FS
División de escala	0,5 psi
Rango de calibración	10 psi a 200 psi

Donde se denota la clase de exactitud con %FS (fondo de escala), ya que se hace referencia a la diferencia máxima existente entre el valor verdadero y el valor indicado por el manómetro expresado como porcentaje. En este caso se tiene como se indica en la tabla anterior que el valor de exactitud se encuentra dentro del 2%, lo que quiere decir que el manómetro utilizado es más preciso en el tercio medio de la escala total.

Condiciones ambientales iniciales:

Los valores de condiciones ambientales a temperatura ambiente y de humedad relativa fueron obtenidos con la ayuda de un termohigrómetro, de esta manera se obtuvieron inicialmente los resultados de la tabla 5.2 :

Tabla 5.2: Condiciones ambientales iniciales. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES INICIALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %
18,2 ± 0,1	62,3 ± 1

Registrar estos valores de condiciones ambientales tanto al inicio de la toma de datos como al finalizar es importante ya que permitirá apreciar si la variación en estas magnitudes se encuentra dentro del rango permitido por el documento de calibración aplicado en este trabajo.

Datos de medida:

Para obtener los datos correspondientes a las medidas, se realizaron varios ensayos, obteniendo los resultados que se aprecian en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6:

Tabla 5.3: Resultados del ensayo 1. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi)
1	10,00	7,55	8,04	8,06
2	40,00	38,45	38,70	38,55
3	80,00	78,17	78,26	78,7
4	120,00	119,19	119,29	119,17

Tabla 5.4: Resultados del ensayo 2. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi)
1	10,00	7,41	7,57	7,94
2	40,00	38,72	38,04	38,26
3	80,00	78,74	78,32	79,10
4	120,00	119,30	119,44	119,20

Tabla 5.5: Resultados del ensayo 3. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi)
1	10,00	7,48	7,51	7,36
2	40,00	37,10	37,00	37,93
3	80,00	77,55	77,35	78,26
4	120,00	117,80	118,36	118,46

Tabla 5.6: Resultados del ensayo 4. (Fuente: esta investigación.)

No. de lectura	Lectura (psi) Manómetro de prueba	Medida 1 Ascendente (psi)	Medida 2 Descendente (psi)	Medida3 Ascendente (psi)
1	10,00	7,90	8,13	7,58
2	40,00	37,46	37,78	37,90
3	80,00	78,72	78,96	78,67
4	120,00	119,0	119,1	118,75

Se registraron de igual manera las condiciones ambientales finales como se muestra a continuación en la tabla 5.7:

Tabla 5.7: Condiciones ambientales finales de trabajo. (Fuente: esta investigación.)

CONDICIONES AMBIENTALES FINALES	
Temperatura °C	Humedad relativa %
18,0 ± 0,1	60,3 ± 1

Cabe resaltar que se eligieron los datos que aparecen en la tabla 5.3, ya que se observó que son los que menos variación presentan comparando entre los valores fijos en el equipo de prueba y los datos obtenidos mediante el patrón.

5.1 Cálculos matemáticos y estadísticos asociados a la incertidumbre de medida

Los cálculos que se muestran a continuación, sólo se realizan para la primera lectura correspondiente a 10 psi y aplicando el procedimiento descrito en el anterior documento como sigue:

Media aritmética o valor medio:

Usando la expresión (4.1), se calculó la media aritmética como sigue:

$$\bar{q}_{10} = \frac{7,55 + 8,04 + 8,06}{3}$$

$$\therefore \bar{q}_{10} = 7,88 \text{ psi} \quad (5.38)$$

La notación aquí usada, es solamente para hacer referencia al punto de calibración al que se hace referencia.

Error de medida E:

Teniendo en cuenta el resultado anterior, el error de medida según la (4.2) expresión es :

$$E_{10} = |\bar{q}_{10} - 10| \quad (5.39)$$

Es decir:

$$\therefore E_{10} = 2.12 \text{ psi} \quad (5.40)$$

Desviación estándar:

Aplicando la expresión (4.3) y usando los resultados de la tabla 5.3 se tiene:

$$s(10) = \sqrt{\frac{1}{n-1} [(7,55 - \bar{q}_{10})^2 + (8,04 - \bar{q}_{10})^2 + (8,06 - \bar{q}_{10})^2]}$$

Donde se ha factorizando el término $\frac{1}{n-1}$ dentro de la raíz. De (5.1) y con $n = 3$ se consigue:

$$s(10) = \sqrt{\frac{1}{2}[(7,55 - 7,88)^2 + (8,04 - 7,88)^2 + (8,06 - 7,88)^2]} \Rightarrow$$

Resolviendo los cuadrados dentro de la raíz:

$$s(10) = \sqrt{\frac{1}{2}[0,1089 + 0,0256 + 0,0324]} \Rightarrow$$

Sumando términos:

$$s(10) = \sqrt{\frac{1}{2}(0,1669)} \Rightarrow$$

Realizando las operaciones indicadas y extrayendo la raíz finalmente se obtiene:

$$s(10) = 0,29psi \quad (5.41)$$

Incertidumbre estimada de medida tipo A

Por medio de la expresión (4.4) y usando el resultado anterior, se obtiene:

$$U_{10} = \frac{0,29}{\sqrt{3}} = 0,17psi \quad (5.42)$$

Incertidumbre asociada a la resolución del Patrón

Como la resolución del patrón utilizado en este trabajo tiene un valor igual a 0,01 psi se tiene por tanto a partir de la expresión (4.5) que:

$$U_{resol} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} \Rightarrow \quad (5.43)$$

$$\therefore U_{resol} = 0,03psi \quad (5.44)$$

Incertidumbre asociada a la calibración del Patrón

Para determinarla, en la expresión (4.6) se necesitan k e I_{max} , los cuales fueron obtenidos mediante el certificado de calibración del patrón. Los resultados del certificado de calibración se muestran en la tabla 5.8:

Tabla 5.8: Resultados correspondientes al certificado de calibración del Patrón. (Fuente: esta investigación.)

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DEL PATRÓN				
Lectura (bar)	Medidas (bar)	Incertidumbre (bar)	Error (bar)	Factor de Cobertura
2	1,9924	0,0029	0,0076	2,06
4	3,9912	0,0026	0,0088	2,02
6	5,9948	0,0028	0,0052	2,04
7	6,9982	0,0028	0,0018	2,06

En donde se puede apreciar que la incertidumbre máxima reportada es $I_{max} = 0,0029$ bar.

Ya que la unidad de presión usada en este trabajo es psi, se hace la conversión de unidades de manera que:

$$1bar = 14,504psi$$

Por lo tanto:

$$0,0029\cancel{bar} \cdot \frac{14,504\cancel{Psi}}{1\cancel{bar}} = 0,04psi$$

Entonces:

$$\therefore I_{max} = 0,04psi$$

Para el factor de cobertura se tomó el valor asociado a la incertidumbre anterior como se ve

en la tabla 5.8. Siendo que esta cantidad es adimensional se tiene por lo tanto que $k = 2,06$.

Ahora reemplazando los resultados anteriores:

$$U_{cal} = \frac{0,04}{2,06} \Rightarrow$$

$$\therefore U_{cal} = 0,02psi \quad (5.45)$$

Incertidumbre por histéresis

A partir los datos de la tabla 5.3 se realizó la diferencia por punto de medida, registrando estos valores en la tabla 4.9, como se indica a continuación en la tabla 5.9:

Tabla 5.9: Resultados primera y segunda diferencia para el cálculo de incertidumbre por histéresis para cada uno de los datos de medida. (Fuente: esta investigación.)

Lectura (psi)	Primera diferencia (psi) Δ_1	Segunda diferencia (psi) Δ_2	diferencia máxima (psi) Δ_{max}
10	0,49	0,02	0,49
40	0,25	0,15	0,25
80	0,09	0,19	0,19
120	0,10	0,12	0,12

Posteriormente por medio de la expresión (4.7) se realizó el cálculo de la incertidumbre de histéresis, tomando para ello la diferencia máxima (Δ_{max}) es decir:

$$U_{Hist_{10}} = \frac{0,49}{\sqrt{12}} \Rightarrow$$

Entonces:

$$\therefore U_{Hist_{10}} = 0,14 psi \quad (5.46)$$

Incertidumbre estándar combinada

Usando cada uno de los resultados de las incertidumbres anteriores y aplicando la expresión (4.8) se tiene que la incertidumbre combinada es:

$$U_{c_{10}} = \sqrt{0,17^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,14^2} \Rightarrow$$

Sumando los cuadrados dentro de la raíz cuadrada:

$$U_{c_{10}} = \sqrt{0,05}$$

Así:

$$\therefore U_{c_{10}} = 0,22 \text{ psi} \quad (5.47)$$

Cálculo del factor de cobertura k

Para obtener el factor de cobertura se encontraron inicialmente los grados de libertad para incertidumbres tipo A y B, que son dados por las expresiones (4.9) y (4.10) respectivamente.

Como en este caso solo se tiene una sola incertidumbre tipo A obtenida de las medidas realizadas, sus correspondientes grados de libertad tras aplicar (4.9) son:

$$v_i = 2 \quad (5.48)$$

Por otro lado se tienen cuatro incertidumbres tipo B correspondientes a resolución del patrón, calibración e histéresis, los grados de libertad para estas incertidumbres se obtienen luego de aplicar la expresión (4.10) como se muestra más adelante.

Teniendo en cuenta que se tomó un nivel de confianza del 95% para la distribución normal, se tiene por tanto que el nivel de desconfianza restante es $5\% = 0,05$ que corresponde al cociente de los corchetes de la expresión (4.10) que es:

$$\frac{\Delta U(x_i)}{u(x_i)} = 0,05$$

Reemplazando este resultado en la expresión (4.10) se obtienen los grados de libertad para las incertidumbres tipo B como sigue:

$$v_i \approx \frac{1}{2} \cdot (0,05)^{-2} \Rightarrow$$

Es decir:

$$v_i \approx 200 \quad (5.49)$$

Ahora reemplazando los resultados (5.11), (5.12) y la incertidumbre combinada para cada uno de los puntos de calibración calculada anteriormente en la expresión (4.11), los grados de libertad efectivos (v_{eff}) se encuentran como:

$$v_{\text{eff}} = \frac{(0,22)^4}{\frac{(0,17)^4}{2} + \frac{(0,03)^4}{200} + \frac{(0,02)^4}{200} + \frac{(0,14)^4}{200}} \Rightarrow$$

Factorizando 200 en el denominador de la expresión anterior y resolviendo la potencia 4 en el numerador entonces:

$$v_{\text{eff}10} = \frac{0,00234256}{\frac{(0,17)^4}{2} + \frac{1}{200} \cdot [(0,03)^4 + (0,02)^4 + (0,14)^4]} \Rightarrow$$

Es decir:

$$v_{\text{eff}10} = \frac{0,00234256}{0,00041953065} \Rightarrow$$

Entonces finalmente:

$$\therefore v_{\text{eff}10} \approx 6 \quad (5.50)$$

Comparando este resultado con los de la tabla (3.3) se tiene que el valor del factor de cobertura encontrado para la primera lectura es $k = 2,45$.

Incertidumbre expandida

Por medio de la expresión (4.12) se encontró la incertidumbre expandida (U_{exp_i}). Por tanto usando el resultado (5.10) y el valor del factor de cobertura encontrado anteriormente, se tiene que:

$$U_{exp_{10}} = 2,45 \cdot 0,22 \Rightarrow$$

Es decir:

$$U_{exp_{10}} = 0,54 \text{ psi} \tag{5.51}$$

De manera análoga se realizan los cálculos respectivos para cada una de las lecturas. De este modo los resultados obtenidos para cada punto de calibración se presentan en la tabla 5.10 como se muestra:

Tabla 5.10: Cálculos e Incertidumbres para los datos obtenidos en la medición. (Fuente: esta investigación.)

CÁLCULOS E INCERTIDUMBRES				
Indicación(psi)	10	40	80	120
Promedio (psi)	7,88	38,57	78,17	119,22
Error (psi)	2,12	1,43	1,83	0,78
Desviación Estándar	0,29	0,13	0,10	0,06
Incertidumbre tipo A (psi)	0,17	0,08	0,06	0,03
Incertidumbre resolución del patrón (psi)	0,03	0,03	0,03	0,03
Incertidumbre de calibración del Patrón (psi)	0,02	0,02	0,02	0,02
Incertidumbre Histéresis (psi)	0,14	0,07	0,05	0,03
Incertidumbre Combinada (psi)	0,22	0,10	0,10	0,06
Factor de Cobertura	2,45	2,57	2,13	2,04
Incertidumbre expandida (psi)	0,54	0,26	0,21	0,12

Con el objetivo de corroborar estos resultados y hacer más práctico este trabajo se utilizó el formato del libro en Excel de la figura 4.3, consiguiendo los resultados que se muestran a continuación en la figura 5.1:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	CONDICIONES AMBIETALES									
2	Temperatura Promedio:		18,1 °C	Variación de Temperat		-0,2 °C				
3	Humedad promedio:		62	Variación de Humedad		-2				
4	CALCULOS E INCERTIDUMBRES									
5	Indicación		10	40	80	120				
6	Promedio		7,88	38,57	78,17	119,22				
7	Error		2,12	1,43	1,83	0,78				
8	Error %		21,2	3,6	2,3	0,7				
9	Desviación Estándar		0,29	0,13	0,10	0,06				
10	Ua		0,17	0,08	0,06	0,03				
11	Resolucion patrón		0,003	0,003	0,003	0,003				
12	Calibracion patrón		0,02	0,02	0,02	0,02				
13	Inctidumre Histeresis		0,14	0,07	0,05	0,03				
14	Combina Uc		0,22	0,10	0,10	0,06				
15	Factor de Cobertura k		2,45	2,57	2,13	2,04				
16	Expandida Uexp		0,54	0,26	0,21	0,12				
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										

Figura 5.1: Hoja de cálculo en Excel para el tratamiento de las incertidumbres. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016.)

Gráfica de Error vs Presión de medida

A continuación se presenta la grafica resultante de error vs presión obtenida para cada uno de los 4 puntos de calibración como se aprecia en la figura 5.2:

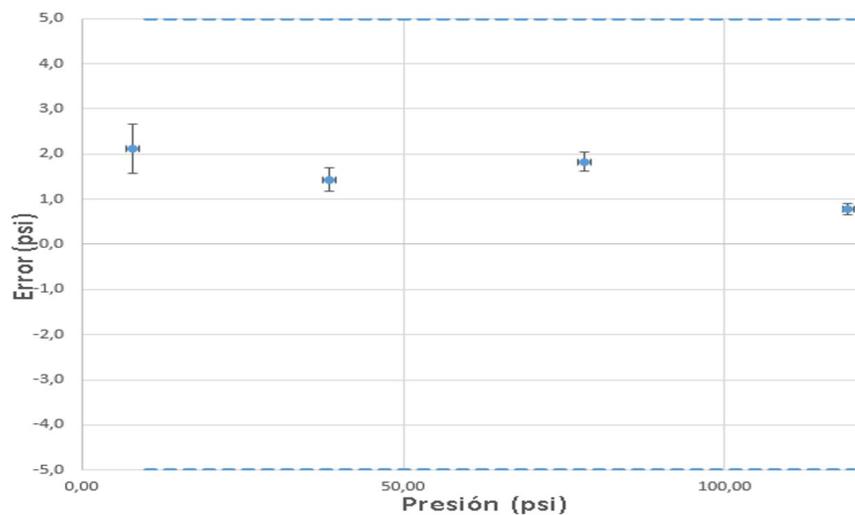


Figura 5.2: Error de medida vs presión promedio de los datos. (Fuente:esta investigación. Software: Excel 2016.

Donde para entender el por qué de los límites de rango ± 5 psi que corresponden al error máximo permitido para la calibración y que se muestran en la anterior gráfica, se basó en la norma norteamericana de la Asociación Americana de Ingenieros mecánicos ASME B40.100, en donde se presenta la clase de exactitud y el número mínimo de puntos de calibración asociados para un manómetro de Bourdon como se puede apreciar en la tabla 5.11 como sigue:

Tabla 5.11: Número mínimo de puntos de calibración asociados a la exactitud de un manómetro analógico. (Tomado de: Diharce, E. (2004)). [7]

Clase de exactitud (%FS)	Número mínimo de puntos de calibración recomendados
4A (0,1)	10
3A, 2A, 1A, A (0,25...1)	5
B,C,D (2...5)	3

En este trabajo se cuenta con un manómetro de exactitud de 1,6% FS (porcentaje de la escala total) que aproximando al número entero mas cercano es 2% FS. Por tanto como se ve en la tabla 5.11 la exactitud del manómetro puede ser clase B, C ó D. Para definir correctamente la clase de exactitud y de acuerdo al documento normativo mencionado anteriormente, el error permisible para algunas clases de exactitudes se presenta en la tabla 5.12 como se muestra:

Tabla 5.12: Error permisible para algunas clases de exactitudes para manómetros Bourdon. (Tomado de: Burns, J.E; Campion, P.J; Williams, A. (1973)). [12]

ERROR PERMISIBLE POR EXACTITUD			
Clase de exactitud (%FS)	Primer cuarto de escala (psi)	Mitad de la escala (psi)	Último cuarto de escala (psi)
A	2,0	1,0	3,0
B	3,0	2,0	3,0
C	4,0	3,0	4,0
D	5,0	5,0	5,0

Como en la calibración realizada en este trabajo se tuvo en cuenta todo el rango de medida del instrumento, queda demostrado que el error máximo permitido para el equipo de prueba usado es de ± 5 psi.

Cabe resaltar que el equipo utilizado para esta calibración, no midió valores de presión superiores a 120 psi debido a que la bomba generadora de presión mostrada en la figura no toleraba presiones de rango más altas que este valor. Se muestra en el Anexo I las imágenes correspondientes a los los datos de presión obtenidos en el equipo patrón.

Certificado de Calibración

De igual manera se anexa el certificado de calibración del equipo de prueba. Una vez que este se genere debe contener: datos del solicitante o cliente, identificación del laboratorio en donde se realizará la calibración, identificación y descripción del equipo bajo prueba, datos del equipo patrón utilizado, método de calibración empleado, condiciones ambientales de calibración, resultados más importantes obtenidos en la calibración y finalmente gráfica de error vs presión promedio de medida.



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Calibrate Certificate

Número de certificado:

Number

tes19-002

SOLICITANTE: <i>Customer</i>	Presición Biomédica	INSTRUMENTO: <i>Instrument</i>	MANÓMETRO BOURDON
ID/NIT: <i>ID/NIT</i>	900643642-2	FABRICANTE: <i>Manufacturer</i>	WINTERS
DIRECCIÓN: <i>Address</i>	Cra 32 A # 20-85	MODELO: <i>Model</i>	0 - 200 PSI
CIUDAD: <i>City</i>	Pasto	SERIAL/AF: <i>Serial/AF</i>	NI
FECHA DE RECEPCIÓN: <i>Reception date</i>	2019-07-20	UBICACIÓN: <i>Location</i>	Laboratorio
FECHA DE CALIBRACIÓN: <i>Calibration date</i>	2019-08-01	MAGNITUD (ES) DE CALIBRACIÓN: <i>Calibration Magnitude (s)</i>	Presión
LUGAR DE CALIBRACIÓN: <i>Calibration place</i>	Laboratorio	NÚMERO DE PÁGINAS: <i>Number of pages</i>	3

FIRMAS AUTORIZADAS:

Fis. María Fernanda Acosta

Directora del Laboratorio - *Director Calibration Lab.*

Revisado por - *Checked by*

Mario Andrés Pantoja Cárdenas

Estudiante - *Student*

Calibrado por - *Calibrated by*

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados. El usuario es responsable de la recalibración de sus instrumentos a intervalos apropiados.

Carrera 32A No. 20 - 85 Pasto // Tel. 7307841 Cel. 3174451997 - 3136555385 // precisionbiomedica@gmail.com

PRECISIÓN BIOMÉDICA S.A.S.

1. Descripción del instrumento:

Manómetro de tubo Bourdon

Rango de presión: 0-200 psi

División de escala: 0.5 psi

Novedades:

2. Trazabilidad e Información del Patrón Utilizado:

<i>Instrumento:</i>	Flow Analyzer
<i>Fabricante:</i>	Imtmedical
<i>Modelo:</i>	PF-300
<i>Serial:</i>	2013BA104509
<i>Fecha de calibración:</i>	2017-10-02
<i>Certificado</i>	L1356

PRECISIÓN BIOMÉDICA S.A.S asegura el mantenimiento de la trazabilidad de los patrones utilizados en estas mediciones y su calibración respectiva a intervalos establecidos con la norma NTC4057.

3. Método de Calibración:

En el proceso de calibración el laboratorio realiza una serie de mediciones, tres medidas para cuatro puntos de uso, se encuentra unos errores de indicación entre el instrumento calibrado y el equipo patrón utilizado; luego estima la incertidumbre con la cual fueron realizadas estas mediciones. El procedimiento utilizado es el documento normativo DKD-R 6-1 del Laboratorio.

4. Incertidumbre de la medición:

La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura obtenido para cada punto de calibración según el procedimiento a seguir y para un nivel de confianza aproximado de 95%. La incertidumbre combinada fue estimada con los componentes de la incertidumbre de calibración del patrón de referencia usado y su resolución como también del procedimiento de calibración.

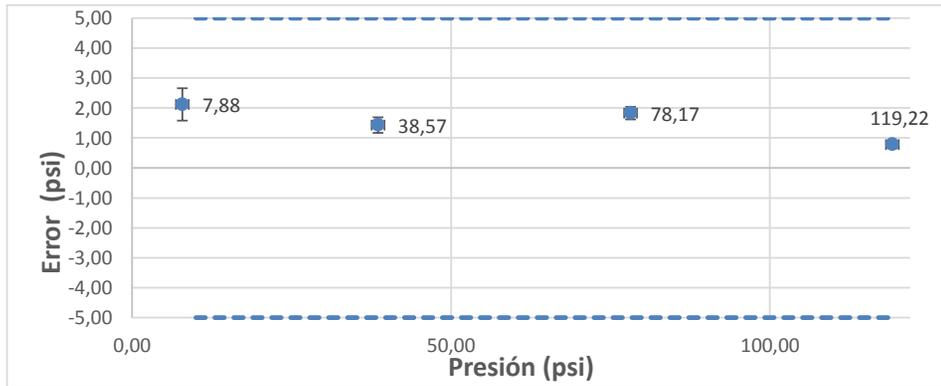
5. Condiciones Ambientales:

<i>Temperatura:</i>	18,2°C	<i>Humedad Relativa:</i>	62,3 %
<i>Variación</i>	0,2°C	<i>Variación:</i>	-2 %

Nota: Las condiciones ambientales se refieren al sitio y momento de la calibración.

6. Datos y resultados de la calibración:

<i>Selección (psi)</i>	10	40	80	120
<i>Indicación (psi)</i>	7,88	38,57	78,17	119,22
<i>Error (psi)</i>	2,12	1,43	1,83	0,78
<i>Error (%)</i>	21,2	3,6	2,3	0,7
<i>Incer. Expandida (psi)</i>	$\pm 0,54$	$\pm 0,26$	$\pm 0,21$	$\pm 0,12$



Nota: Se muestra en la gráfica anterior el error máximo permitido en la calibración se representa por la línea discontinua que corresponde a $\pm 5,00$ psi.

7. Observaciones

Los certificados sin firmar no tienen ningún tipo de validez.

FIN DEL CERTIFICADO
End of the certificate

Resultados de calibración del equipo bajo prueba obtenidos por el laboratorio acreditado

Los resultados obtenidos tanto de condiciones ambientales de trabajo como de calibración del equipo bajo prueba por el laboratorio acreditado por el ONAC Especialistas en Metrología se muestran en la tablas 5.13 y 5.14, como se muestra a continuación:

Tabla 5.13: Condiciones ambientales de trabajo obtenidas por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)

Temperatura Promedio	23,8 ± 0,1 °C
Humedad relativa promedio	51,4% ± 1,0%
Presión atmosférica	870,9 hPa ± 0,2 hPa

Tabla 5.14: Resultados de medida obtenidos por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)

Lectura Promedio del patrón (psi)	Lectura Promedio del instrumento (psi)	Error (psi)	Factor de Cobertura k	Incertidumbre Expandida (psi)*
8,28	10,00	1,73	2,0	± 0,61
38,33	40,00	01,68	2,0	± 0,61
79,10	80,00	0,90	2,0	± 0,61
119,30	120,00	0,70	2,0	± 0,61

La diferencia máxima encontrada entre el patrón de calibración y el instrumento de prueba se muestra en la tabla 5.15:

Tabla 5.15: Diferencia máxima reportada por laboratorio acreditado. (Fuente: Laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.)

Error máximo	1.73 psi
--------------	----------

La gráfica de Error vs. Presión promedio de medida para la calibración realizada en este trabajo se muestra en la figura 5.3:

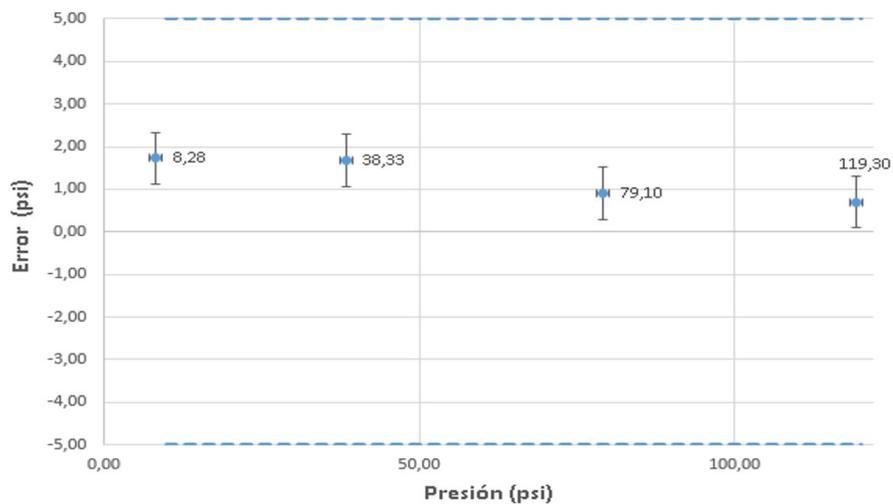


Figura 5.3: Resultados Error vs. Presión por laboratorio acreditado. (Fuente: laboratorio acreditado por ONAC, Especialistas en metrología S.A.S.; software: Excel 2016.)

Se presenta a continuación una gráfica superpuesta para los dos laboratorios, en donde se puede apreciar los resultados obtenidos en la calibración llevada a cabo en este trabajo y los obtenidos por el laboratorio acreditado como se ve en la figura 5.4:

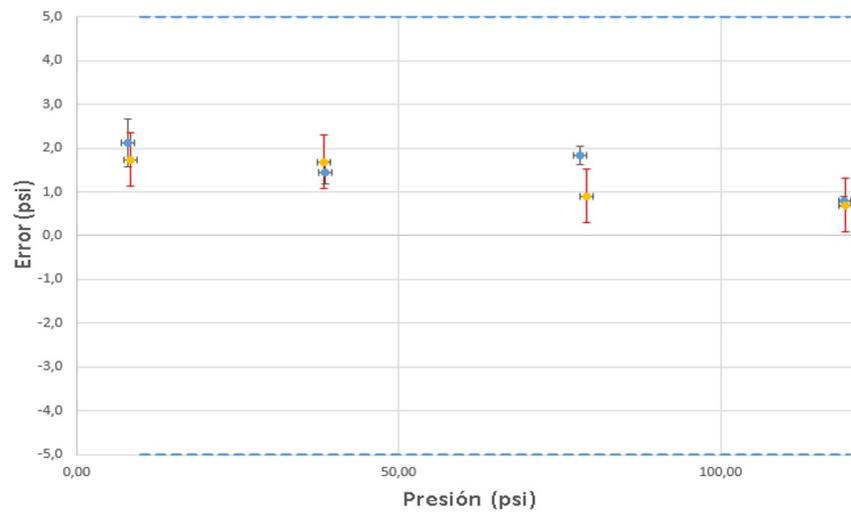


Figura 5.4: Superposición de resultados de calibración en este trabajo y los obtenidos por laboratorio acreditado. (Fuente: esta investigación. Software: Excel 2016).

Donde los puntos de color azul representan los resultados obtenidos en la calibración descrita en este trabajo y los anaranjados a los del laboratorio acreditado. Se muestran también las incertidumbres correspondientes a cada una de las medidas las cuales están representadas por los segmentos negro y rojo para cada uno de los puntos respectivamente.

Captulo 6

Análisis y conclusiones

6.1 Análisis de resultados:

En los resultados mostrados en la tabla 5.10, se observa que la mayor diferencia entre el equipo patrón y el equipo bajo prueba es 2,12 psi, marcados por la primera medida de 10 psi.

Comparando este resultado con el error máximo de 1.73 para el mismo punto de 10 psi, obtenido por el laboratorio acreditado se tiene que la variación del error máximo entre las calibraciones es:

$$\Delta_{maxError} = |2.12 - 1.73| \Rightarrow$$

Es decir

$$\therefore \Delta_{maxError} = 0,39 \text{ psi} \quad (6.52)$$

Se puede apreciar que el factor de cobertura k en los resultados del laboratorio acreditado de la tabla 5.14 permanece constante en todos los puntos de medida, mientras que para los resultados de la tabla 5.10 tienen un valor diferente. Sin embargo, cabe resaltar que estos valores obtenidos de factor de cobertura en la tabla 5.10 son aceptables ya que para niveles de confianza desde 95,45%, pasando por un nivel de 95% hasta 99,47% esta cantidad siempre tiende a tomar un valor entre 2,00 y 3,00.

Por otra parte se ve para la incertidumbre expandida en la tabla 5.10, que este valor es diferente para cada punto de calibración siendo la lectura 1 la que presenta su mayor valor y la 4 menor mientras que en los resultados de la tabla 5.14 este valor permanece constante para cada una de las lecturas.

En la tabla 6.1 se muestra una comparación entre los valores medios obtenidos para cada

uno de los puntos de medida correspondientes a la calibración realizada en este trabajo y en el laboratorio acreditado:

Tabla 6.1: Comparación de resultados entre laboratorio acreditado y los obtenidos en este trabajo: (Fuente: esta investigación.)

Lectura (psi)	Valor medio Calibración en sitio (psi)	Valor medio Calibración externa (psi)	Diferencia (psi)
10	7,88	8,28	0.4
40	38,57	38,33	0.24
80	78,17	79,10	0.93
120	119,22	119,30	0.08

Donde se puede ver que la mayor dispersión o diferencia entre las calibraciones en los dos laboratorios es de 0.93 psi y la presenta la tercera lectura, 80 psi.

En lo concerniente a las incertidumbre tipo A, de histéresis, combinada y expandida se puede apreciar notablemente en la tabla 5.10 como éstas van disminuyendo a medida que la indicación se hace mayor, siendo así que la lectura 1 es la que más alejada está del valor de indicación 10 psi al presentar mayor error y más alto valor para las incertidumbres estimadas. Por otra parte la lectura 4 fue la que más se acercó al valor ideal de medida 120 psi ya que además de ser la que menor error tiene, presenta un menor valor para las incertidumbres mencionadas.

Respecto a la incertidumbres de resolución y calibración del patrón, es un valor que permanece fijo en las observaciones ya que no se cambia en ningún momento de un patrón a otro, se debe tener en cuenta que cambiar las condiciones en los equipos utilizados podría contribuir a un valor adicional de incertidumbre y posiblemente genere mayor contribución al error.

Teniendo en cuenta la figura 5.2, se puede apreciar que los resultados de error vs. presión obtenidos están dentro del valor permitido para la calibración realizada ya que están dentro del intervalo de error permitido demostrado en el documento anterior ± 5 psi. Comparando estos resultados con los de la figura 5.3 ambos resultados de calibración se encuentran dentro del rango de error máximo permitido.

Por otra parte se puede ver para la lectura 1 de la figura 5.2, presenta la mayor incertidumbre, la cual está determinada por el tamaño del intervalo vertical de color negro representado en la gráfica, mientras que este mismo intervalo de incertidumbre es más pequeño para la lectura 4. Respecto a los resultados obtenidos por el laboratorio acreditado, se puede ver para cada una de las lecturas de la figura 5.3, los intervalos de incertidumbre son siempre del mismo tamaño.

Con respecto al error de medida, se puede notar claramente como las lecturas 1 y 3 son las que mayor error presentan en la figura 5.2, lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 5.10, mientras para los resultados del laboratorio acreditado el mayor de error de medida se ve representada en las lecturas 1 y 2 que puede observarse también en la tabla 5.14.

Comparando los resultados obtenidos en ambas calibraciones en la figura 5.4, se puede apreciar una mayor dispersión de error para las lecturas 1 y 3, mientras que las lecturas 2 y 4 están menos distanciadas de las obtenidas por el laboratorio acreditado. En lo que concierne a las incertidumbres de la figura 5.4, se puede notar la mayor diferencia para la medida 4 y la menor para la lectura 1.

6.2 Conclusiones:

- El procedimiento de calibración aplicado en este trabajo permite tener medidas aceptables de presión, ya que se puede ver en los resultados obtenidos en las la tabla 5.10 y 5.14 que los valores medios por lectura no se diferencian demasiado, deduciendo que en condiciones ambientales controladas como presión atmosférica y temperatura ambiente, el procedimiento aplicado en este trabajo es valido y confiable.
- El factor de cobertura k es una cantidad que depende de las incertidumbres asociadas,

tanto las de tipo A como B. Siendo de esta manera que los resultados aquí encontrados para este factor son confiables ya que cumplen con los valores esperados para un nivel de confianza del 95%.

- Para cada uno de los puntos de calibración se verificó que la incertidumbre expandida asociada tiene un valor distinto al contrario de los resultados obtenidos por el laboratorio acreditado en donde todos los puntos tienen el mismo valor.
- Se debe llevar a cabo la calibración en condiciones ambientales controladas como por ejemplo temperatura, ya que de no hacerlo se puede conseguir una mayor variación en las medidas deseadas y por ende considerar mayor número de fuentes de incertidumbre.
- La comparación de resultados con los de un laboratorio acreditado permite tener cierta perspectiva respecto a la calidad del proceso realizado, ya que en este caso se puede considerar buena la calibración realizada en este trabajo, ya que los resultados obtenidos no se alejan demasiado de los obtenidos por un laboratorio acreditado.
- Al considerar mayor cantidad de fuentes de incertidumbre como las estimadas en este trabajo, puede llegar a obtenerse una mayor certeza sobre el valor verdadero de medida.
- Se recomienda cambiar el patrón utilizado en la calibración realizada en este trabajo por uno digital y de más fácil uso, con el fin de que la toma de datos sea más práctica y más eficiente.

Apéndice A

Apéndice I

En esta sección se incluyen las fotografías para cada uno de los datos tomados por punto a calibrar. Ya que fueron realizadas 3 medidas, se tienen por tanto 3 fotos para las lecturas obtenidas en el equipo patrón por punto de calibración junto a la correspondiente indicación en el manómetro de Bourdon. Se tiene entonces un total de 12 imágenes en donde se aprecian los valores obtenidos.

Se presenta posteriormente el certificado de calibración del equipo patrón, con el cual se pretende dar una información más detallada del equipo utilizado para la calibración realizada, así como también las cotizaciones para el manómetro de prueba por el laboratorio acreditado por la ONAC.

Para el primer punto de calibración correspondiente a 10 psi se tienen las imágenes de la figura A.1:



Figura A.1: Indicación digital y análoga para el primer punto de calibración 10 psi. (Fuente: esta investigación.)

En donde la primera lectura mostrada en la parte superior izquierda del set de imágenes anterior corresponde al valor del primer punto de calibración en forma ascendente. Cabe resaltar que se verificó antes de tomar cualquier dato que el equipo patrón indicaba correctamente el punto cero, apreciando que no se presentaba una influencia por presiones pequeñas en los valores que fueran obtenidos posteriormente. De igual manera se siguió estrictamente cada uno de los pasos del procedimiento descrito en el capítulo 4 para la toma de cada uno de los datos de medida. Por otro lado se aprecia en la imagen superior derecha la segunda lectura, correspondiente al valor del primer punto de calibración en forma descendente y finalmente se indica la tercera lectura en la parte inferior izquierda que corresponde al mismo punto de calibración pero nuevamente en forma ascendente. Cabe aclarar que para la toma de todos los datos, se hicieron también los ajustes respectivos, es decir se verificó que no hayan fugas

de aire en ninguna parte del montaje y se ajustó el patrón para que mida en las unidades correspondientes de medida de presión que en este caso son psi.

Para el segundo punto de calibración, se tienen las imágenes de la figura A.2:



Figura A.2: Indicación análoga y digital para el segundo punto de calibración 40 psi. (Fuente: esta investigación.)

En donde se aprecia en la imagen superior izquierda el primer valor del segundo punto de calibración tomado de forma ascendente, de manera análoga se mira el segundo valor de la segunda lectura en la parte superior derecha el cual se tomó de manera descendente. En la parte inferior izquierda se ve claramente el valor obtenido en la tercera lectura para el segundo punto de calibración el cual fue obtenido de manera ascendente y junto a esta se muestra la respectiva indicación en el manómetro de prueba.

Para el tercer punto de calibración se obtuvieron las fotos de la figura A.3 como se indica:



Figura A.3: Indicación digital y análoga para el tercer punto de calibración 80 psi. (Fuente: esta investigación.)

Donde se ven los valores de las indicaciones de las lecturas correspondientes al tercer punto de calibración y de obtenidas de forma similar a los puntos de calibración anteriores, iniciando de manera ascendente, luego descendente y por último ascendente. Se muestra la respectiva indicación en el equipo de prueba.

Finalmente el punto de calibración número 4, se obtuvieron los datos que se muestran en la figura A.4:



Figura A.4: Indicación digital y análoga para el cuarto punto de calibración 120 psi. (Fuente: esta investigación.)

Donde se aprecian los valores obtenidos para cada una de las lecturas del cuarto punto de calibración de manera similar a todo lo anterior, junto a su respectiva indicación análoga.



SC-CER338123

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD CERTIFICADO

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No L1356 CALIBRATION CERTIFICATE No L1356

Página 1 de 3

Cliente: PRECISIÓN BIOMEDICA S.A.S.
Customer:
Dirección: Kr. 32 No. 20 - 85
Address:
Ciudad: PASTO - NARIÑO
City:
Instrumento: ANALIZADOR DE FLUJOS EN GASES
Instrument:
Modelo: PF-300
Model:
Fabricante: IMT MEDICAL
Manufacturer:
Serie No. 2013BA 104509
Serial No.
Activo No. EQ-PAT-12
Asset No.
Fecha de Calibración: OCTUBRE 02 DE 2017
Calibration Date:
Lugar de Calibración: LABORATORIO
Calibration Place:

Fecha de Expedición: OCTUBRE 03 DE 2017
Issue Date:

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados. El usuario es responsable de la recalibración de sus instrumentos a intervalos apropiados.

This certificate express faithfully the results of the realised measurements. The results contained in the present certificate are at the moment and conditions in which the measurements were realised. The laboratory not makes responsible of the damages that can be derived from the inadequate use of the calibrated instruments. The user is responsible for the instrument recalibration at appropriate intervals.

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido, excepto de manera completa, sin al aprobación escrita del laboratorio.

This calibration certificate cannot be reproduced except in full, without written approval from the laboratory

Firma Autorizada

Authorized signatures

ING. MIGUEL ANGEL CASTRO LEAL
Director Laboratorio de Calibración

Director Calibration Lab

REALIZADO POR: ING. LEONARDO QUEVEDO



SC-CER338123

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD CERTIFICADO

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No L1356

CALIBRATION CERTIFICATE No L1356

Página 2 de 3

Método de calibración: INSTRUCTIVO INTERNO IN-S-073 CALIBRACIÓN DE ANALIZADOR DE FLUJO DE GASES
Calibration Method: GASES

Condiciones ambientales: Temperatura
Environmental Conditions: Humedad Relativa

INICIAL	FINAL	Δ
21,7°C	21,8°C	0,1°C
56%	57%	1%

Trazabilidad: Las mediciones realizadas son trazables al Sistema Internacional de Unidades según los siguiente certificado expedido por COLMETRIK y BIOSANCTA: JERINGA VOLUMETRICA HANS RUDOLPH 5540 sn.2121, Certificado de Calibración No L928 de Fecha: ABRIL 12 DE 2016 - JERINGA VOLUMETRICA HANS RUDOLPH 5510 sn.551-1641, Certificado de Calibración No L929 de Fecha: ABRIL 12 DE 2016 - JERINGA VOLUMETRICA WELCH ALLYN 703480 sn.76424, Certificado de Calibración No L927 de Fecha: ABRIL 12 DE 2016 - MANÓMETRO DIGITAL ADDITEL 681 SN 211H13670012, Certificado de Calibración No 17005 de Fecha: MARZO 31 DE 2016 - MANÓMETRO DIGITAL OMEGA DPG-4000-100 SN 1700049, Certificado de Calibración No CMK-PRES-17654 de Fecha: SEPTIEMBRE 9 DE 2017
Traceability:

Incertidumbre de medición La Incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura K, calculado conforme a los grados de libertad y el factor de Student para un probabilidad de 95.45%.
Measurement Uncertainty

The Expanded Uncertainty of the measurement has been obtained multiplying the combined uncertainty by the coverage factor K, calculated according to effective degrees of freedom and the Student Factor for a 95.45% probability.

DATOS DE CALIBRACIÓN CALIBRATION DATA

Presión Diferencial - Canal "+"

Espec. cmH2O	Medido cmH2O	Incert. cmH2O	Error cmH2O	K
30	30,1	0,10	0,1	2,05
60	60,1	0,10	0,1	2,06
90	90,2	0,10	0,2	2,05
120	120,2	0,094	0,2	2,03
150	150,2	0,091	0,2	2,02

Presión Diferencial - Canal "-"

Espec. cmH2O	Medido cmH2O	Incert. cmH2O	Error cmH2O	K
-30	-30,1	0,086	-0,1	2,01
-60	-60,3	0,087	-0,3	2,01
-90	-90,4	0,088	-0,4	2,01
-120	-120,5	0,12	-0,5	2,13
-150	-150,7	0,09	-0,7	2,02

Presión Positiva Via Aérea

Espec. cmH2O	Medido cmH2O	Incert. cmH2O	Error cmH2O	K
20	20,1	0,085	0,1	2,01
40	40,3	0,088	0,3	2,01
60	60,4	0,088	0,4	2,01
80	80,5	0,088	0,5	2,01
100	100,7	0,087	0,7	2,01



SC-CER338123

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD CERTIFICADO

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No L1356

CALIBRATION CERTIFICATE No L1356

Página 3 de 3

Presión Alta

Espec. bar	Medido bar	Incert. bar	Error Bar	K
2	1,9924	0,0029	-0,0076	2,06
4	3,9912	0,0026	-0,0088	2,02
6	5,9948	0,0028	-0,0052	2,04
7	6,9982	0,0028	-0,0018	2,06

Flujo Rango Alto (ATP - Aire)

Espec. L/min	Medido L/min	Incert. L/min	Error L/min	K
40	46,3	0,20	6,3	2,21
60	70,1	0,24	10,1	2,18
80	93,6	0,24	13,6	2,20
100	117,9	0,31	17,9	2,00

Volumen - Flujo Alto (ATP - Aire)

Espec. mL	Medido mL	Incert. mL	Error mL	K
101,1	106,4	0,70	5,3	2,65
1001,42	1128	2,6	126,58	2,87

% CO₂

Espec. %CO2	Medido mL	Incert. mL	Error mL	K
5,20	4,52	0,010	-0,68	2,00

***** FIN DE CERTIFICADO *****

***** END OF CERTIFICATE *****

Se muestra en la tabla A.1 las cotizaciones realizadas en algunos de los distintos laboratorios acreditados por ONAC, para la calibración del equipo de prueba:

Tabla A.1: Cotizaciones realizadas en laboratorios acreditados por ONAC para la calibración del equipo de prueba. (Fuente: esta investigación.)

Laboratorio	Ciudad	Costo
Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín ITM	Medellín	\$115,350.00
ESPECIALISTAS EN METROLOGÍA S.A.S.	Pereira	\$115,000.00
PINZUAR S.A.S.	Bogotá	\$180,000.00
IMPROTEC LTDA.	Bogotá	\$129,710
Compañía Nacional de Metrología Conamet	Bogotá	\$420,000.00
FLEXILATINA DE COLOMBIA LTDA.	Bogotá D.C.	\$250,000.00
DOXA INTERNACIONAL S.A.S	Medellín	\$106,000.00

De donde se seleccionó ESPECIALISTAS EN METROLOGÍA S.A.S., cabe decir que se esperaron 15 días hábiles en recibir nuevamente el equipo de prueba después de la calibración realizada en este laboratorio acreditado por la ONAC.

Bibliografía

- [1] DIRECTRIZ DKD-R 6-1 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS MEDIDORES DE PRESIÓN. *Publicado por el Servicio Alemán de Calibración (DKD)*, bajo los auspicios del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) y como resultado de la cooperación entre el PTB y los laboratorios de calibración acreditados junto con el Comité Técnico “Presión y Vacío”. Derechos del autor: Copyright © 2014 by DKD.
- [2] CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Vocabulario internacional de Metrología-Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3ª edición, 2012.
- [3] HERNÁNDEZ, S.; SÁNCHEZ, O.; LARROTA, G. Y PÉREZ, J. Y RODRÍGUEZ ALEJANDRO. CALIBRACIÓN DE UN MANÓMETRO DE BOURDON MEDIANTE UN BANCO GENERADOR DE PRESIÓN UTILIZANDO ACEITE MINERAL COMO FLUIDO. *Ingeciencia*, vol. 2, No. 1, Universidad Central-Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, 2017.
- [4] MARTINEZ, V. Y MICHILENA, E. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS. Universidad Politécnica Salesiana-Sede Quito, 2015.
- [5] CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA-MINISTERIO DE INDUSTRIA TURISMO Y COMERCIO-GOBIERNO DE ESPAÑA. PROCEDIMIENTO ME-003 PARA LA CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS, VACUÓMETROS Y MANOVACUÓMETROS. España, 2005.
- [6] CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA-MINISTERIO DE INDUSTRIA TURISMO Y COMERCIO-GOBIERNO DE ESPAÑA. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. España 2008.
- [7] DIHARCE, ENRIQUE. EL NÚMERO EFECTIVO DE GRADOS DE LIBERTAD. Centro de Investigación en Matemáticas, A. C. Jalisco, Mineral de Valenciana, 2004.
- [8] RUÍZ, ANTONIO. Y GARCÍA, JOSÉ. Y MESA, JOSÉ . ERROR, INCERTIDUMBRE, PRECISIÓN Y EXACTITUD, TÉRMINOS ASOCIADOS A LA CALIDAD

ESPACIAL DEL DATO GEOGRÁFICO. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén, 2010.

- [9] TAYLOR, B.N.; KUYADHTT, C.E. . Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note. Washington, 1994.
- [10] ISO/IEC (GENEVA:ISO). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2008.
- [11] (GENEVA: ISO).International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms. 3rd ed. 2008.
- [12] BURNS, J.E.; CAMPION, P.J.; WILLIAMS, A. *Error and uncertainty*. En: IOPScience Metrologia. Vol. 9, (Feb, 1973); págs. 12-17.