



Evaluación de la confiabilidad metrológica de manómetros tipo Bourdon utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios

**Jorge Luis Silva Cueto
Efrain Chaljub Berdugo**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia

2021

Evaluación de la confiabilidad metrológica de manómetros tipo Bourdon utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios

**Jorge Luis Silva Cueto
Efrain Chaljub Berdugo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

PhD. José Daniel Hernández Vásquez

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2021

Dedicado a nuestras familia, amigos y profesores que nos apoyaron incansablemente en esta lucha para alcanzar este gran logro que se avecina.

En estos momentos difíciles que vivimos en nuestra vida por el Covid-19 que ha alterado nuestra rutina, pero ni este gran problema nos ha hecho bajar los brazos para luchar por nuestros sueños. Hemos podido vencer obstáculos y poder culminar con éxitos nuestra etapa de estudiantes para alcanzar la meta de ser unos profesionales.

JORGE LUIS SILVA CUETO

EFRAIN CHALJUB BERDUGO

Agradecimientos

A DIOS por haber nacido, y bendecirnos cada día con salud.

A mi Madre por ser un apoyo desde mi etapa de escolar hasta llegar a esta que ya culminó.

A mi Padre por siempre tener siempre su energía positiva que me llenan de ganas y para seguir adelante en mis estudios.

Agradecemos, muy especialmente, a nuestro profesor José Daniel Hernández Vásquez por su orientación y enseñanzas a lo largo del proyecto.

A nuestra Institución Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia por permitirnos hacer parte de esta carrera y servir como base para culminar este gran sueño que se avecina.

Resumen

Este proyecto ha sido desarrollado para analizar y aplicar un método que nos ayude a evaluar el desempeño de los manómetros herramienta fundamental en los procesos industriales, dentro de los soportes técnicos hemos tomado como parte fundamental el análisis e investigación y aplicabilidad del proceso de comparación entre laboratorios de calibración basados en el criterio del error normalizado, considerado con suma importancia dentro de esta actividad los resultados esperados de este trabajo es poder garantizar la confiabilidad de un instrumento de medición como lo es el manómetro tipo bourdon que es utilizado en la mayoría de las industrias. Además, se espera aplicar el método de los mínimos cuadrados ordinarios para determinar un polinomio interpolador que permita la obtención de medidas de presión ajustadas y, consecuentemente, confiables. Los resultados consolidados permitieron concluir que la aplicación del método de los mínimos cuadrados permitió concluir que el desempeño metrológico de los manómetros es estadísticamente igual para un rango de medida entre 0 y 30 psi, dentro de un nivel de confianza de 95,0%. Lo anterior indica que los manómetros pueden ser utilizados en procesos que contemplen el rango de medición evaluado.

Palabras clave: Calibración, Confiabilidad metrológica, Incertidumbre de medición, Manómetro tipo Bourdon, Medición de presión.

Abstract

This project has been developed to analyze and apply a method that helps us evaluate the performance of pressure gauges, a fundamental tool in industrial processes, within the technical supports we have taken as a fundamental part the analysis and investigation and applicability of the comparison process between laboratories based on the standard error criterion, considered with great importance within this activity, the expected results of this work is to be able to guarantee the reliability of a measuring instrument such as the Bourdon type manometer that is used in most industries. . In addition, it is expected to apply the ordinary least squares method to determine an interpolating polynomial that allows obtaining tight and, consequently, reliable pressure measurements. The consolidated results allowed to conclude that the application of the least squares method allowed to conclude that the metrological performance of the pressure gauges is statistically the same for a measurement range between 0 and 30 psi, within a confidence level of 95.0%. The above indicates that the pressure gauges can be used in processes that contemplate the evaluated measurement range.

Keywords: Calibration, Metrological reliability, Measurement uncertainty, Bourdon type manometer, Pressure measurement.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 14 |
| 1.1 Formulación del problema | 16 |
| 1.2 Objetivos | 17 |
| 1.2.1 Objetivo general | 17 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 17 |
| 1.3 Justificación..... | 18 |
| 1.4 Diseño metodológico | 18 |
| 2. Fundamentos de la medición de presión | 20 |
| 2.1 Instrumentos de medición de presión | 20 |
| 2.2 Análisis de incertidumbre asociada a la medición | 27 |
| 2.2.1 Método de los mínimos cuadrados ordinarios..... | 27 |
| 2.2.2 Cálculo de incertidumbre de medición..... | 29 |
| 2.2.3 Método del error normalizado | 30 |
| 3. Diseño de experimentos | 32 |
| 3.1 Procedimiento experimental | 32 |
| 3.1 Descripción del sistema de medición | 33 |
| 4. Resultados y discusión | 36 |
| 4.1 Manómetro Measureman..... | 36 |
| 4.2 Manómetro Rockage | 54 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones | 70 |
| Bibliografía | 73 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Tensiones en un fluido..... | 14 |
| Figura 2 – Tensiones normales en un elemento infinitesimal de fluido | 14 |
| Figura 3. Configuración del barómetro de Torricelli. | 20 |
| Figura 4. a) barómetro Fortin; b) manómetro McLeod. | 21 |
| Figura 5. a) Transmisor de presión tipo Bourdon. b) Elementos elásticos comúnmente utilizados en los transmisores de presión. | 22 |
| Figura 6 – Manómetro Fluke | 34 |
| Figura 7 – Manómetro Measureman..... | 34 |
| Figura 8 – Manómetro Rockage..... | 35 |
| Figura 9 – Sistema hidráulico de medición de presión..... | 35 |
| Figura 10. Manómetro Measureman: Gráfico de histéresis | 39 |
| Figura 11. Manómetro Measureman: Polinomio de primer grado..... | 40 |
| Figura 12. Manómetro Measureman: Polinomio de segundo grado | 42 |
| Figura 13. Manómetro Measureman: Polinomio de tercer grado..... | 44 |
| Figura 14. Manómetro Measureman: Polinomio de cuarto grado..... | 46 |
| Figura 15. Manómetro Measureman: indicación del instrumento vs error | 53 |
| Figura 16. Manómetro Measureman: presión ajustada vs error | 53 |
| Figura 17. Manómetro Rockage: Gráfico de histéresis | 56 |
| Figura 18. Manómetro Rockage: Polinomio de primer grado..... | 57 |
| Figura 19. Manómetro Rockage: Polinomio de segundo grado | 59 |
| Figura 20. Manómetro Rockage: Polinomio de tercer grado..... | 60 |
| Figura 21. Manómetro Rockage: Polinomio de cuarto grado..... | 62 |
| Figura 22. Manómetro Rockage: indicación del instrumento vs error..... | 69 |
| Figura 23. Manómetro Rockage: presión ajustada vs error | 69 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Definiciones de presión..... | 23 |
| Tabla 2. Errores máximos permisibles..... | 24 |
| Tabla 3. Valores permisibles de sobre-presión. | 26 |
| Tabla 4. Límites de variación de presión en manómetros..... | 26 |
| Tabla 5. Manómetro Measureman: Ciclo 1..... | 36 |
| Tabla 6. Manómetro Measureman: Ciclo 2..... | 37 |
| Tabla 7. Manómetro Measureman: Ciclo 3..... | 37 |
| Tabla 8. Estimación de valores de medios en la calibración..... | 38 |
| Tabla 9. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado uno..... | 41 |
| Tabla 10. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado dos..... | 43 |
| Tabla 11. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado tres..... | 45 |
| Tabla 12. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado cuatro | 47 |
| Tabla 13. Resumen del cálculo de desviación media cuadrática | 47 |
| Tabla 14. Cálculo de error, corrección e incertidumbre expandida..... | 48 |
| Tabla 15. Manómetro Rockage: Ciclo 1..... | 54 |
| Tabla 16. Manómetro Rockage: Ciclo 2..... | 54 |
| Tabla 17. Manómetro Rockage: Ciclo 3..... | 54 |
| Tabla 18. Estimación de valores de medios en la calibración..... | 55 |
| Tabla 19. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado uno..... | 58 |
| Tabla 20. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado dos..... | 59 |
| Tabla 21. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado tres..... | 61 |
| Tabla 22. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado cuatro | 63 |
| Tabla 23. Resumen del cálculo de desviación media cuadrática | 64 |
| Tabla 24. Cálculo de error, corrección e incertidumbre expandida..... | 65 |

1. Introducción

En la literatura clásica, la presión está asociada a la dimensión de una fuerza por unidad de área [1]. Además, la presión en un punto de un fluido estático es independiente de la orientación [2]. Así, la presión es un escalar, y representa el primer invariante de las tensiones mecánicas en un fluido, como se muestra en la Figura 1:

$$\begin{vmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{vmatrix}$$

Figura 1 – Tensiones en un fluido

Fuente: Fox (1995) [1]

De acuerdo con la hipótesis de Stokes, la presión puede ser definida como la media de las tensiones normales en un elemento fluido [3], es decir: tomando en consideración el promedio de las sigmas de la diagonal principal como se muestra en la Figura 2.

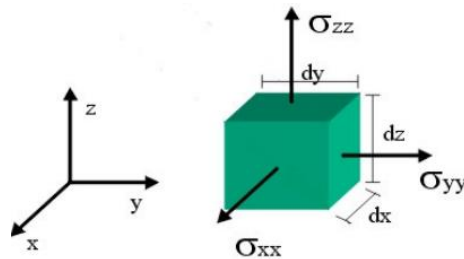


Figura 2 – Tensiones normales en un elemento infinitesimal de fluido

Fuente: Fox (1995) [1]

Para la medición de presión, diversos son los instrumentos existentes en la actualidad para el control y monitoreo de esta variable físicas. Cada medidor opera según un determinado principio físico y, su selección, está en función de las características metrológicas del proceso. La literatura [4-6], presenta las principales funciones, aplicaciones y características para diferentes tipos de medidores de presión utilizados en la industria y, también, sus criterios de selección.

Así, a lo largo del tiempo la medición de presión se ha convertido en un factor crítico en todos los procesos metrológicos realizados (e.g.: medición de flujo de líquidos y gas, procesos de balances de energía, así como sistemas electromecánicos). En este sentido, la calibración de los instrumentos para el control de la medición de presión resulta en una actividad fundamental que debe con el objetivo de conocer su confiabilidad metrológica.

La confiabilidad metrológica es definida como la capacidad de tener seguridad, confianza en los resultados obtenidos a través de mediciones [7]. Este concepto está íntimamente relacionado con los procesos de ingeniería a nivel industrial, donde en un mundo cada vez más competitivo, se hace, imprescindible, estimar y conocer los parámetros metrológicos (e.g.: errores sistemáticos y aleatorios, error de histéresis, incertidumbres, tolerancias) que contribuyen a la mejora continua de los diversos procesos de medición en la industria. En particular, la medición de presión, al igual que la temperatura y la medición de flujo, corresponde a una de las variables física de mayor impacto a nivel industrial y, por consiguiente, de alta criticidad en los procesos de medición [8]. En este sentido, se torna fundamental, no sólo el funcionamiento de ingeniería asociado a esta instrumentación, sino, determinar criterios metrológicos que permitan la mejora continua de los procesos, tal como definido el estudio realizado por Ennaifer & Kuchuk [9]. Los autores [9], cuya investigación fue orientado al análisis estadístico de un medidor de presión para aplicaciones en la industria de petróleo y gas natural, afirman que conocer parámetros asociados a la medición de presión, es fundamental para definir criterios de aceptación en un reservorio de petróleo, identificar la permeabilidad y las barreras del reservorio.

Con el avance de la tecnología, la confiabilidad metrológica de manómetros, desde su fabricación, ha sido un desafío para la ciencia de las mediciones y un anhelo para la

industria. En este sentido, diversas patentes han sido desarrolladas en Estados Unidos [10, 11] con el propósito de mejorar el error por histéresis, el cual está íntimamente relacionada a la fabricación mecánica de un manómetro e influye de forma significativa, produciendo impactos negativos durante la operación [12].

En este orden de ideas, especialistas del área, afirman que implementar técnicas estadísticas robustas que permitan evaluar la confiabilidad metrológica de manómetros es un tema de interés para la industria contemporánea con beneficios, técnicos-económicos, incuestionables [13-15].

1.1 Formulación del problema

Actualmente, en los procesos industriales, no se cuentan con claridad y total conocimiento sobre la confiabilidad metrológica de todos los manómetros para medir presión en un determinado proceso. Además, muchos de estos instrumentos no cuentan con un certificado de calibración que permita identificar la confiabilidad metrológica de esta instrumentación, así como aspectos que impactan de forma significativa en el proceso de medición, por ejemplo: errores, histéresis e incertidumbres. Esto, se constituye en una falencia para el proceso industrial, debido a que: (i) no existe confiabilidad en los resultados obtenidos para un determinado experimento, (ii) no se crea un entendimiento claro sobre el proceso y el rigor metrológico que se debe controlar un proceso de medición en la industria, (iii) está en contravía a lo establecido en normas internacionales para el control de calidad de sistemas de medición en la industria, tal cual definido en el inciso a) del numeral 7.5.1 de la norma ISO 9001:2015:

“Cuando la trazabilidad de las mediciones es un requisito, o es considerada por la organización como parte esencial para proporcionar confianza en la validez de los resultados de la medición el equipo de medición debe:

a) calibrarse o verificarse, o ambas, a intervalos especificados, o antes de su utilización, contra patrones de medición trazables a patrones de medición internacionales o nacionales; cuando no existan tales patrones, debe conservarse como información documentada la base utilizada para la calibración o la verificación”

Lo anterior genera una problemática, que debe ser atendida por la academia para el servicio de la industria. El problema yace en la necesidad de estimar la fiabilidad de las mediciones realizadas por los medidores de presión, esto es relevante considerando que un proceso industrial, se debe visionar que el comportamiento de sus instrumentos de medición sea análogo al comportamiento que estos mismos instrumentos tendrían en la industria.

En este orden de ideas, una vez descrita la problemática presentada, se espera que el desarrollo del trabajo de grado, así como los resultados consolidados que deriven del mismo, contribuyan al fortalecimiento de las mediciones obtenidas a nivel industrial para el control de una magnitud tan importante como lo es la medición de presión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la confiabilidad metrológica de manómetros tipo Bourdon utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender el objetivo general de la investigación, tres objetivos específicos han sido formulados:

- realizar la calibración y certificación de los manómetros tipo Bourdon, esto con el fin de garantizar la trazabilidad metrológica de los resultados a patrones de medición nacionales e internacionales;
- aplicar el método de los mínimos cuadrados ordinarios, con el propósito de obtener polinomios interpoladores que permitan estimar valores de presión ajustados en todo el rango de indicación de los instrumentos;
- calcular la incertidumbre de ajuste (desviación media cuadrática), para especificar el polinomio que mejor caracteriza la naturaleza física del experimento, para un nivel de confianza igual a 95,0%;

- especificar la contribución de la cada fuente de incertidumbre, con el fin de proponer estrategias que permitan aumentar la confiabilidad metrológica de los manómetros tipo Bourdon en condiciones de operación.

1.3 Justificación

Este proyecto de investigación encuentra su fundamento en la búsqueda del mejoramiento continuo de las mediciones realizadas por los medidores de presión tipo Bourdon, utilizados en el sector industrial. A fin de mejorar la confiabilidad metrológica de las mediciones realizadas por los medidores de presión, es imperante colocar en práctica las diferentes técnicas metrológicas y estadísticas disponibles en la literatura, entre las cuales se tienen el método de los mínimos cuadrados ordinarios y el análisis de incertidumbre, según la teoría consagra en la Guía para la estimación de la Incertidumbre de Medición (GUM, 2008).

A partir del uso de estas técnicas es posible: (i) calibrar un instrumento de medición en todo el rango del instrumento; (ii) obtener la certificación de cada instrumento de medición calibrado, por medio de un Laboratorio de Metrología, con el propósito de atender los requisitos impuestos en la norma ISO 9001:2015; (iii) determinar un polinomio interpolador que permita representar, para un determinado nivel de confianza, el comportamiento físico del experimento; (iv) evaluar el impacto de las diversas variables que contribuyen en la incertidumbre de medición asociada a un instrumento (e.g.: resolución, patrón de medición, repetibilidad, interpolación polinomial).

Durante las etapas de este proyecto de grado se buscará aplicar cada técnica metrológica descrita anteriormente, a fin de conseguir resolver la problemática planteada en la sección anterior.

1.4 Diseño metodológico

El desarrollo del presente proyecto se apoyó de una revisión preliminar del estado del arte, continuando con el plan de trabajo que se describe a continuación:

- ***Etapas 1: Realización de experimentos***

En esta etapa se realizó la calibración de los instrumentos de medición. Es importante resaltar que el papel de contactar un Laboratorio está asociado, al uso de patrones de

medición garanticen la trazabilidad metrológica de los resultados experimentales. Los estudiantes investigadores tomaron 11 puntos de calibración, con tres ciclos de carga ascendente y descendente. Además, de estimar un polinomio interpolador que permita obtener valores reales de presión para aquellos puntos que no fueron calibrados. Esto garantiza confiabilidad metrológica.

- ***Etapa 2: Análisis estadístico de los datos***

Una vez obtenidos los datos experimentales se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos. Para esto, se espera hacer uso del software Microsoft Excel como herramienta de cálculo, así como generación de tablas y curvas de calibración. El análisis de errores e incertidumbre asociada a la medición de presión será fundamentado en los conceptos definidos en la Guía Para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM, 2008) [16]. La formulación matemática que fundamenta el análisis polinomial, producto de la aplicación del método de los mínimos cuadrados ordinarios, será detallada en el texto del trabajo. A pesar de esto, la obtención de los distintos polinomios será realizada con el auxilio de fórmulas preestablecidas en la herramienta de cálculo de Microsoft Excel.

- ***Etapa 3: Análisis de resultados, elaboración de conclusiones y documento final***

Una vez obtenidos los resultados consolidados de la investigación se procederá a realizar un análisis detallado de los mismos, con el propósito de discutir los aspectos más relevantes obtenidos y proponer estrategias que permitan la mejora continua de procesos asociados a la medición de presión. Así mismo, las conclusiones de la investigación serán redactadas en función de cada objetivo específico propuesto. Finalmente, la elaboración del documento final será realizada y estará disponible para la asignación de evaluadores conforme a las directrices definidas por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB) de la Universidad Antonio Nariño.

2. Fundamentos de la medición de presión

Este capítulo consolida los conceptos fundamentales el proceso de medición de presión, así como los instrumentos utilizados y las normas aplicadas.

2.1 Instrumentos de medición de presión

El óptimo desempeño de los procesos industriales depende del control y medición de una variada cantidad de magnitudes físicas (e.g.: temperatura, velocidad, presión, humedad, entre otras de igual relevancia). Es tarea de la ciencia e ingeniería innovar constantemente con nuevos instrumentos de control y de medición a fin de tornar más confiable el desarrollo de cualquier proceso de medición, tanto a nivel industrial como investigativos en laboratorio.

La presión es una de las magnitudes físicas que es objeto de estudio en la ingeniería mecánica. Desde el siglo XVII y, por medio del ingenio de Evangelista Torricelli, la comunidad científica comenzó a observar los primeros instrumentos focalizados a mensurar la presión. Específicamente en el año 1643 Torricelli diseñó los primeros barómetros. La Figura 3 ilustra la configuración típica del barómetro de Torricelli.



Figura 3. Configuración del barómetro de Torricelli.
Fuente: Adaptado de [5]

A lo largo de los años nuevos instrumentos de medición de presión han sido desarrollados, algunos de estos son: el barómetro Fortin (Figura 4a), fabricado por F. Fortin (1750-1831); el manómetro McLeod [6] (Figura 4b), creado por Herbert McLeod en 1874 [6].

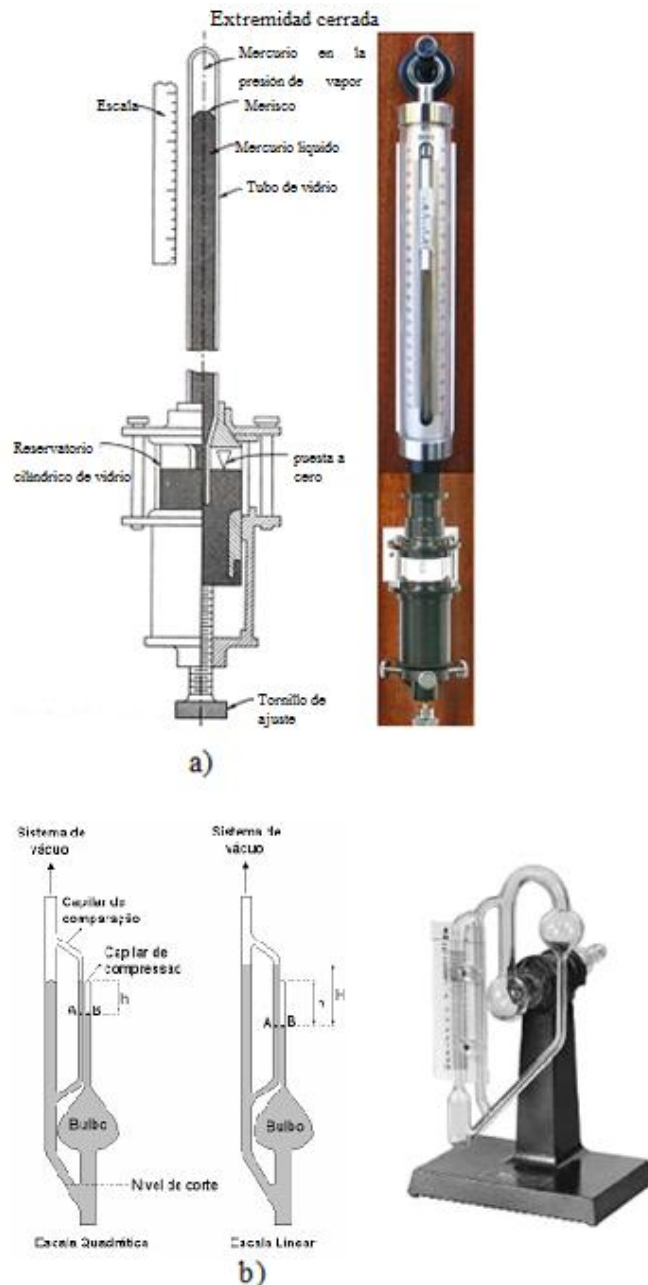


Figura 4. a) barómetro Fortin; b) manómetro McLeod.

Fuente: Adaptado de [7]

Un poco más cerca de la actualidad, los instrumentos aceptados en la comunidad industrial para medir las variaciones de presión, son los transmisores de presión. El principio físico de estos elementos encuentra su base en la transformación de una presión medida en una señal mecánica o eléctrica. Generalmente los sensores de presión se basan en la deformación o deflexión de algún elemento elástico. Algunos de los elementos elásticos básicos son apreciables en la Figura 5.

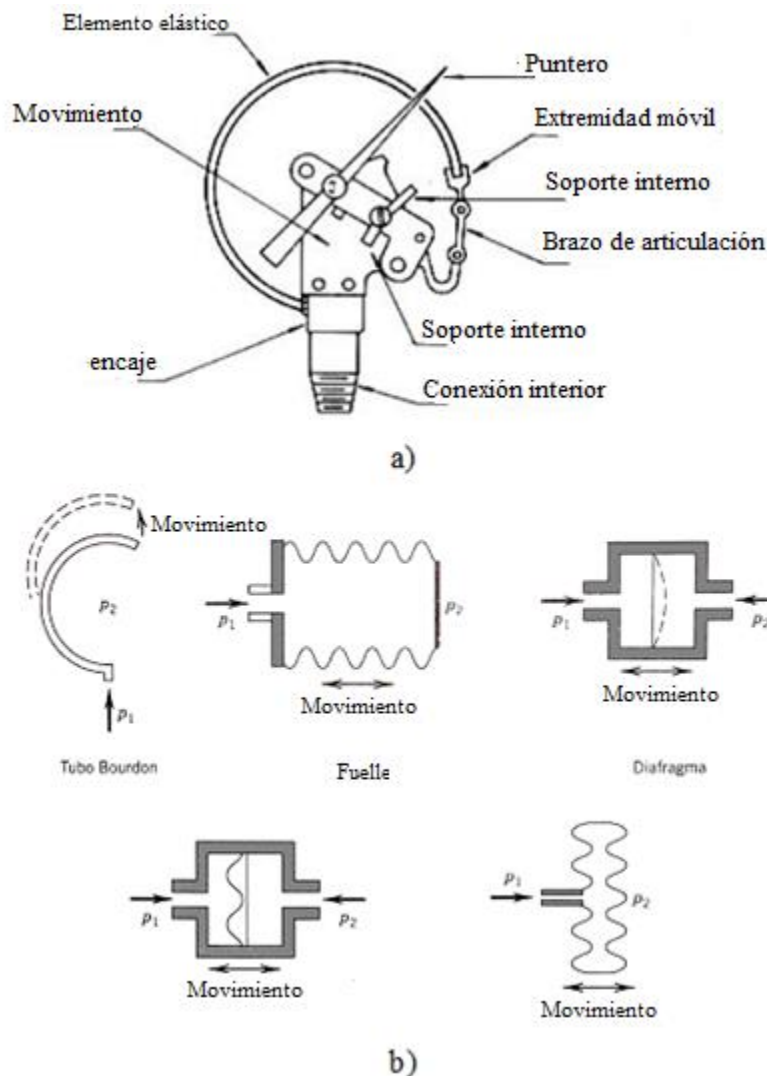


Figura 5. a) Transmisor de presión tipo Bourdon. b) Elementos elásticos comúnmente utilizados en los transmisores de presión.

Fuente: Adaptado de [5]

En relación con la normatividad aplicada, la norma NTC 1420:2001 [15] esboza, entre otros aspectos, las características principales a nivel metrológico que deben poseer los manómetros tipo Bourdon.

En esta norma se presentan:

- requisitos impuestos por la metrología legal para aquellos instrumentos en los cuales el proceso de medición secuencial transmite directamente la deformación del elemento sensor a un dispositivo indicador;
- limitaciones entorno del intervalo de aplicación, una vez que se aplica únicamente a los instrumentos en los cuales el límite superior del rango de medición está entre 0,05 MPa y 1000 MPa;
- consideraciones para establecer algunas definiciones referentes a la presión.

El Cuadro siguiente presenta las distintas definiciones de la magnitud objeto de estudio en este proyecto, presión: (i) manométrica; (ii) vacuométrica; (iii) ambiental; (iv) estacionaria y (v) variable.

Tabla 1. Definiciones de presión

| |
|---|
| Presión manométrica |
| •Corresponde a la presión mayor que la presión ambiente, siendo esta última el punto de referencia. |
| Presión vacuométrica |
| •Refiere a la presión menor que la presión ambiente, siendo esta última el punto de referencia. |
| Presión ambiental |
| •Corresponde a la presión del ambiente en el lugar donde y en el tiempo cuando se realizan las mediciones con el instrumento. |
| Presión estacionaria |
| •Corresponde a la presión que no varía, o que varía de manera continua, a velocidades que no exceden 1 % del límite superior del rango de medición por segundo, para instrumentos, con escala unilateral, o 1 % de la suma de los límites superiores de los rangos de medición por segundo, para instrumentos con escala bilateral. |
| Presión variable |
| •Refiere a la presión que varía de acuerdo con alguna ley, periódica o no, a una velocidad entre: 1% y 10% del límite superior del rango de medición por segundo, para instrumentos con escalas unilaterales. |

La Tabla 2 muestra los errores máximos permisibles (EMP) establecidos por la norma NTC 1420:2001. Puede ser observado que estos errores se encuentran en función de la clase de exactitud del manómetro¹.

Tabla 2. Errores máximos permisibles

| Clase de exactitud | Límites del error permisible (porcentaje del intervalo) |
|---------------------------|--|
| 0,1 | ± 0,1% |
| 0,25 | ± 0,25% |
| 0,6 | ± 0,6% |
| 1 | ± 1% |
| 1,6 | ± 1,6% |
| ,5 | ± 2,5% |
| 4 | ± 4% |

Fuente: Norma NTC 1420:2001

Con relación al error de histéresis en los manómetros tipo Burdon, la norma NTC 1420:2001 establece que no debe exceder el valor absoluto de los límites de error permisible y adicionalmente deben ser llevadas en consideración las siguientes condiciones de referencia:

- a) Los instrumentos deben instalarse en posición normal.
- b) La variación en presión debe ser lenta y continua, con el fin de suprimir el efecto de la fuerza de inercia.
- c) La temperatura de los instrumentos y la temperatura ambiente debe ser igual a 20 °C con una desviación que no lleve a una variación de indicación mayor a 1/5 del máximo error permisible.
- d) La humedad relativa no debe exceder el 80 %.

¹ La clase de exactitud, que establece los límites del error permisible, se expresa como un porcentaje del rango del instrumento. Son definidas, por la norma NTC 1420:2001, las siguientes clases de exactitud: 0,1; 0,25; 0,6; 1; 1,6; 2,5 y 4.

- e) No debe haber variaciones y choques, o no deben alcanzar un valor que origine una oscilación de la aguja indicadora con una amplitud mayor a 1/10 de la longitud de la división de escala más pequeña.
- f) El extremo de acople del instrumento que se está verificando y del instrumento de referencia debe estar en el mismo plano horizontal; si esta condición no se cumple, la presión debida a la columna del líquido usado debe tenerse en cuenta.
- g) El medio (gas o líquido) usado para transmitir presión en el momento de la verificación (excepto en casos donde un medio particular se especifica para el instrumento verificado) debe ser: Un gas neutro, para instrumentos con el límite superior del rango de medición no mayor a 0,5 MPa.

En términos de la variación en la indicación de los instrumentos debido a la variación en temperatura no debe exceder el parámetro definido por la Ecuación 1:

$$\pm\alpha(t_2 - t_1)\% \quad (1)$$

En esta ecuación;

t_1 = temperatura de referencia;

t_2 = temperatura ambiente;

α = coeficiente de temperatura especificado en requerimientos nacionales.

La calidad de los manómetros en los procesos de medición tal que deben ser capaces de resistir un exceso de presión:

- a) Por 6 h, igual al límite superior del rango de medición;
- b) Por 15 min, excediendo el límite superior del rango de medición por un valor A_p como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Valores permisibles de sobre-presión.

| Límite superior del rango de medición, MPa | Ap como % del límite superior del rango de medición |
|---|--|
| Hasta 60 incluido | 10 |
| Desde 60 hasta 1000 | 5 |

Los instrumentos deben poder soportar una presión variable de manera continua, con una frecuencia que no exceda 1 Hz, entre los límites y para el número total de ciclos indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites de variación de presión en manómetros

| Límite superior del rango de medición, MPa | Límites de variación de presión como un % de límite superior del rango de medición | Número de ciclos |
|---|---|-------------------------|
| De 0,05 a 10 | 30 – 70 | 15000 |
| De 10 a 60 | 40 – 60 | 10000 |
| De 60 a 160 | 40 – 60 | 5000 |
| De 160 a 1 000 | 40 – 60 | 1000 |

Antes de iniciar a usar un determinado manómetro o realizar un proceso de calibración, es necesario realizar una inspección visual que evalúe las siguientes características:

- a) Símbolo de la unidad de medida
- b) Designación de la clase de precisión
- c) Condiciones nominales, si estas difieren de las condiciones de referencia
- d) Cualquier otro símbolo o inscripción de valor relacionada con el uso del instrumento.

Cuando existe la necesidad de realizar algún control metrológico sobre los manómetros indicadores de presión; los manómetros de vacío o los manómetros de presión-vacío, se debe aplicar los siguientes controles:

- a) Patrón aprobado
- b) Verificación inicial de los instrumentos nuevos o reparados
- c) Verificación periódica de los instrumentos en servicio.

El patrón de evaluación para cada tipo de instrumento, producido por cada uno de los productores, se lleva a cabo con el fin de verificar la conformidad de las características metrológicas del patrón con todos los requerimientos de esta norma y con los correspondientes nacionales.

Los instrumentos se someterán individualmente a verificaciones iniciales y subsecuentes. La escogencia de las características a verificar debe restringirse como sea posible así como la simplicidad de los métodos de control, pero deben ser suficientes para reconocer las capacidades del instrumento para su uso.

Los instrumentos a los cuales se les han realizado pruebas de verificación continua serán sellados y se les aplicará marcas de control de acuerdo con los requerimientos nacionales.

2.2 Análisis de incertidumbre asociada a la medición de presión

El proceso de caracterización metrológica llevado a cabo en este proyecto de grado, abarcó tres etapas, definidas como: (i) **Calibración**, basándose en el método de los mínimos cuadrados ordinarios; (ii) **Cálculo de incertidumbre** con base en las directrices definidas en la ISO-GUM y (iii) **Evaluación metrológica** de la relación entre el manómetro y el proceso de medición que éste controla. Este análisis fue realizado a partir del método estadístico del error normalizado.

A seguir se discrimina en detalle la técnica estadística utilizada en cada etapa.

2.2.1 Método de los mínimos cuadrados ordinarios

El método de los mínimos cuadrados ordinarios es el más utilizado en ingeniería, física y otras ciencias experimentales a fin de ajustar datos y parámetros.

A manera de ejemplificación, el método de los mínimos cuadrados puede ser utilizado para ajustar los parámetros a_0 y b_0 de la recta dada por:

$$y = a_0 + b_0x \quad (2)$$

El método consiste en determinar los valores de a_0 y b_0 que minimizan la suma de las diferencias cuadráticas entre la recta y los puntos experimentales divididos por las respectivas varianzas (la varianza es el cuadrado de la desviación estándar):

$$Q(a_0, b_0) = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a_0 - b_0x_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

A partir del ajuste de datos por medio del método de los mínimos cuadrados ordinarios se puede obtener un polinomio de ajuste de grado m .

$$y(x_i) = C_m x_i^m + C_{m-1} x_i^{m-1} \dots + C_{m-m} x_i^{m-m} \quad (4)$$

El mejor polinomio de ajuste de un grupo de datos es escogido a partir de la menor desviación media cuadrático (s).

$$s = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{[y(x_i) - y_i]^2}{n - m - 1}} \quad (5)$$

En esta ecuación;

$y(x_i)$: corresponde al valor ajustado;

y_i : corresponde al valor medido por el patrón de medición;

x_i : corresponde al valor indicado por el instrumento;

n : número de puntos medidos;

m : grado del polinomio de ajuste.

Para cada polinomio determinado se debe calcular el correspondiente valor de s , el menor valor de s corresponderá al mejor polinomio de ajuste, y a su vez generará la curva de calibración de un instrumento de medición.

2.2.2 Cálculo de incertidumbre de medición

La incertidumbre refleja la falta de conocimiento exacto de un valor medido. El resultado de una medición, después de las correcciones de los efectos sistemáticos reconocidos, es solamente una estimativa del valor medido [2].

La incertidumbre de medición es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al valor medido [2].

Existen diversas fuentes de incertidumbre, a seguir, algunos ejemplos:

- a) Muestra de datos no representativa del fenómeno estudiado.
- b) Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición o medición imperfecta de las condiciones ambientales.
- c) Error de la tendencia del personal en la lectura de instrumentos analógicos.
- d) Resolución finita del instrumento.
- e) Valores inexactos de los patrones de medición y materiales de referencia.
- f) Variaciones en las observaciones repetidas del mensurando sobre condiciones aparentemente idénticas.
- g) Ajuste de datos experimentales mediante técnicas estadísticas.

A continuación, se definen los principales términos asociados al cálculo de incertidumbre de medición.

- a) ***Incertidumbre patrón:*** Incertidumbre del resultado de una medición expresada como desviación estándar.
- b) ***Evaluación de incertidumbre tipo A:*** Método de evaluación de incertidumbre por el análisis estadístico de series de observaciones.
- c) ***Evaluación de incertidumbre tipo B:*** Método de evaluación de incertidumbre que no corresponden al análisis estadístico de series de observaciones.
- d) ***Incertidumbre combinada:*** Incertidumbre del resultado de una medición, cuando este resultado es obtenido por medio de los valores de varias otras magnitudes, siendo igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, que constituyen las varianzas o covarianzas de estas otras grandezas,

ponderadas de acuerdo a cuanto el resultado de la medición varía con los cambios de estas magnitudes. La Ecuación 6 presenta las magnitudes que generalmente determinan la incertidumbre combinada (u).

$$u = \sqrt{u_{ajuste}^2 + u_p^2 + u_{ins}^2} \quad (6)$$

En esta ecuación;

u_{ajuste} : Corresponde al menor valor de la desviación media cuadrática (s)

u_p : Corresponde a la incertidumbre de medición asociada al patrón de medición

u_{ins} : Corresponde a la incertidumbre asociada a la resolución del instrumento de medición evaluado.

- e) **Incertidumbre expandida:** Cantidad que define un intervalo entorno del resultado de una medición con el cual se espera abarcar una grande fracción de la distribución de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando. La fracción puede ser vista como la probabilidad de cobertura o nivel de confianza del intervalo.
- f) **Factor de cobertura:** Factor numérico utilizado como un multiplicador de la incertidumbre patrón combinada a fin de obtener una incertidumbre expandida.

2.2.3 Método del error normalizado

Este criterio de aceptación es uno de los más comunes dentro de las comparaciones entre laboratorios e instrumento de medición. Para este criterio se requiere un valor de referencia (patrón de medición) con su correspondiente incertidumbre y se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- Los errores de los instrumentos respecto al valor de referencia siguen una distribución normal de probabilidad.
- Las incertidumbres de los errores, del valor de referencia y de los valores de referencia están expresados con el mismo factor de cobertura, usualmente igual a dos (2). Esto supone que la desviación estándar de la función de distribución de probabilidad de errores es la mitad del denominador del error normalizado.
- La correlación entre los datos experimentales de los instrumentos es nula.

En términos matemáticos, cuando es calculada la incertidumbre expandida (U) a partir de una serie de datos experimentales, el valor verdadero (X_y) debe estar dentro del intervalo

$(X \pm U)$. Cuando esta condición no es cumplida, dicho intervalo puede estar subestimado, en este caso debe ser aplicado el concepto de error normalizado (E_n):

$$E_n = \frac{|X - X_y|}{\sqrt{U^2 + U_{ref}^2}} \quad (7)$$

En esta ecuación;

X: valor indicado por el instrumento de prueba;

X_y : valor indicado por el patrón de medición;

U: incertidumbre expandida estimada para el instrumento de prueba;

U_{ref} : incertidumbre asociada al valor medio de los instrumentos de medición evaluados;

E_n : error normalizado.

Para la situación donde; $|E_n| \leq 1$, es considerado que los instrumentos son estadísticamente igual para un nivel de confianza especificado. En el caso particular de esta investigación, el nivel de confianza utilizado es igual a 95,0%.

3. Diseño de experimentos

Este capítulo, inicialmente describe el proceso experimental y los patrones de referencias utilizados en el procedimiento de calibración.

3.1 Procedimiento experimental

Para el desarrollo de los experimentos fue contactado al laboratorio de metrología para el auxilio de las calibraciones y demás actividades experimentales realizadas en el proyecto de grado. Este laboratorio se encuentra en proceso de acreditación por la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación) y certificado por el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). En este punto es importante diferenciar el papel del laboratorio de metrología y los experimentos desarrollados por los investigadores del proyecto de grado.

En primer lugar, es importante resaltar que la NTC 1420:2001, en su numeral 10.2 (Exactitud e Histéresis), define el número mínimo de puntos experimentales que deben ser evaluados a lo largo de la escala de medición de un manómetro tipo bourdon, *i.e.*:

- para manómetros de clases 0,1; 0,25 y 0,6: mínimo 10 puntos.
- para manómetros de clases 1, 1,6 y 2,5: mínimo 5 puntos;
- para manómetros de clase 4: mínimo 4 puntos.

Considerando que la clase de exactitud de los manómetros tipo Bourdon evaluados en la presente investigación pertenecen a la clase 1 y 1,6 se deben evaluar un mínimo de 5 puntos experimentales a lo largo de la escala del instrumento, con el fin de atender los requisitos normativos (NTC 1420:2001). En ese orden de ideas, el laboratorio de metrología

auxilió en las actividades técnicas relacionadas a la calibración de los manómetros a través de la evaluación de 6 puntos experimentales en el rango de cada manómetro. A partir de estos datos es posible emitir un certificado de calibración para cada manómetro el cual es de suma importancia para los procesos de medición a nivel industrial. Por otro lado, una vez finalizado el proceso de calibración para la emisión del certificado se prosiguió con la adquisición de los datos experimentales del proyecto de grado. Este proceso consistió en la toma de 11 puntos experimentales para carga ascendente y 11 para carga descendente. Adicionalmente, se realizaron 3 ciclos para evaluar la repetibilidad de cada instrumento. De esta forma fueron completados 66 puntos experimentales y fue posible estimar la media aritmética de las mediciones así como su incertidumbre asociada con 95% de probabilidad.

Cabe resaltar que, en esta etapa de la investigación se atiende el primer objetivo específico de la investigación *–realizar la calibración y certificación de los manómetros tipo Bourdon, esto con el fin de garantizar la trazabilidad metrológica de los resultados a patrones de medición nacionales e internacionales–* una vez realizados los experimentos con manómetros patrones certificados, se garantiza que los resultados de esta investigación son trazables a patrones nacionales e internacionales.

3.1 Descripción del sistema de medición

En el curso de los experimentos fueron utilizados dos manómetros digitales patrones. Un primer instrumento patrón correspondió a un manómetro del fabricante Fluke (modelo 700G06), con rango de medición de 0 a 100 psi; resolución de 0,01 psi e incertidumbre de medición máxima de 0,015 psi. Adicionalmente, también se utilizó un manómetro digital patrón cuyo fabricante es Measureman, con rango de medición de 0 a 30 psi; resolución de 0,1 psi e incertidumbre de medición máxima de 0,21 psi. También se utilizó un manómetro analógico marca Rockage, con un rango de operación entre 0 y 100 psi. Las Figuras 6 a 9 describen los instrumentos y el sistema de medición.



Figura 6 – Manómetro Fluke

Fuente: Autores 2021



Figura 7 – Manómetro Measureman

Fuente: Autores 2021



Figura 8 – Manómetro Rockage

Fuente: Autores 2021



Figura 9 – Sistema hidráulico de medición de presión

Fuente: Autores 2021

4. Resultados y discusión

Esta sección detalla los distintos resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados en la investigación. Con el propósito de atender los objetivos específicos formulados en el capítulo inicial, los siguientes parámetros de cada manómetro evaluado: datos experimentales, análisis de calibración, gráfico de histéresis, polinomios de ajuste, cálculo de errores, incertidumbre y consideraciones finales.

4.1 Manómetro Measureman

Las Tablas 5 a 7 muestran los datos experimentalmente obtenidos durante el curso de la investigación. Para cada ciclo fueron medidos 22 puntos experimentales (11 para carga ascendente y 11 para carga descendente). De esa forma, 66 puntos fueron experimentalmente obtenidos para el Manómetro Measureman.

Tabla 5. Manómetro Measureman: Ciclo 1

| CICLO 1 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,01 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| 2 | 3,00 | 3,0 | 3,00 | 3,0 |
| 3 | 6,00 | 6,0 | 6,00 | 6,0 |
| 4 | 8,98 | 9,0 | 8,94 | 9,0 |
| 5 | 11,97 | 12,0 | 11,88 | 12,0 |
| 6 | 15,02 | 15,0 | 14,98 | 15,0 |
| 7 | 18,06 | 18,0 | 17,96 | 18,0 |
| 8 | 21,40 | 21,0 | 21,38 | 21,0 |
| 9 | 23,96 | 24,0 | 23,96 | 24,0 |
| 10 | 26,87 | 27,0 | 26,91 | 27,0 |
| 11 | 29,85 | 30,0 | 29,85 | 30,0 |

Tabla 6. Manómetro Measureman: Ciclo 2

| CICLO 2 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,01 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| 2 | 3,00 | 3,0 | 3,00 | 3,0 |
| 3 | 6,00 | 6,0 | 6,00 | 6,0 |
| 4 | 8,98 | 9,0 | 8,94 | 9,0 |
| 5 | 11,95 | 12,0 | 11,88 | 12,0 |
| 6 | 15,03 | 15,0 | 14,98 | 15,0 |
| 7 | 18,06 | 18,0 | 17,96 | 18,0 |
| 8 | 21,38 | 21,0 | 21,38 | 21,0 |
| 9 | 23,96 | 24,0 | 24,01 | 24,0 |
| 10 | 26,89 | 27,0 | 26,91 | 27,0 |
| 11 | 29,87 | 30,0 | 29,87 | 30,0 |

Tabla 7. Manómetro Measureman: Ciclo 3

| CICLO 3 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,01 | 0,0 | 0,01 | 0,0 |
| 2 | 3,00 | 3,0 | 3,01 | 3,0 |
| 3 | 6,01 | 6,0 | 6,00 | 6,0 |
| 4 | 8,98 | 9,0 | 8,92 | 9,0 |
| 5 | 11,97 | 12,0 | 11,88 | 12,0 |
| 6 | 15,04 | 15,0 | 14,98 | 15,0 |
| 7 | 18,06 | 18,0 | 18,02 | 18,0 |
| 8 | 21,42 | 21,0 | 21,38 | 21,0 |
| 9 | 23,96 | 24,0 | 23,96 | 24,0 |
| 10 | 26,87 | 27,0 | 26,91 | 27,0 |
| 11 | 29,85 | 30,0 | 29,85 | 30,0 |

Una vez adquirido los datos experimentales, se procedió a realizar los cálculos pertinentes cálculos estadísticos. La Tabla 8 presenta la estimación de los valores medios para carga ascendente y descendente, así como el cálculo de error de histéresis.

Tabla 8. Estimación de valores de medios en la calibración

| Puntos | Valores medios | | | | Histéresis |
|--------|------------------|-------------|-------------------|-------------|------------|
| | Carga Ascendente | | Carga Descendente | | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento | |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,01 | 0 | 0,00 | 0,0 | 0,01 |
| 2 | 3,00 | 3 | 3,00 | 3,0 | 0,00 |
| 3 | 6,00 | 6 | 6,00 | 6,0 | 0,00 |
| 4 | 8,98 | 9 | 8,93 | 9,0 | 0,05 |
| 5 | 11,96 | 12 | 11,88 | 12,0 | 0,08 |
| 6 | 15,03 | 15 | 14,98 | 15,0 | 0,05 |
| 7 | 18,06 | 18 | 17,98 | 18,0 | 0,08 |
| 8 | 21,40 | 21 | 21,38 | 21,0 | 0,02 |
| 9 | 23,96 | 24 | 23,98 | 24,0 | 0,02 |
| 10 | 26,88 | 27 | 26,91 | 27,0 | 0,03 |
| 11 | 29,86 | 30 | 29,86 | 30,0 | 0,00 |

Para ejemplificar los datos de la tabla anterior, a continuación se desglosa un algoritmo que representa como fueron obtenidos tales resultados para el *punto experimental número 5*. Los otros resultados fueron obtenidos de forma similar.

- **Para carga ascendente:**
 $(DE1a + DE2a + DE3a)/3 = P1a$
 $(11,97+11,95+11,97)/3 = 11,96 \text{ psi}$
- **Para carga descendente:**
 $(DE1d + DE1d + DE1d)/3 = P1d$
 $(11,88+11,88+11,88)/3 = 11,88 \text{ psi}$
- **Para error de histéresis:**
 $ABS (P1a - P1d) = EH$
 $ABS (11,96 - 11,88) = 0,08 \text{ psi}$

La nomenclatura anterior corresponde a:

DE1a: Dato experimental del ciclo 1 para carga ascendente;

DE2a: Dato experimental del ciclo 2 para carga ascendente;

DE3a: Dato experimental del ciclo 3 para carga ascendente;

P1a: Valor promedio obtenido para carga ascendente;

P1d: Valor promedio obtenido para carga descendente;

ABS (P1a - P1d): Valor absoluto entre la diferencia para carga ascendente y descendente;
EH = Error de Histéresis

La Figura 10 ilustra la indicación instrumento (Manómetro Measureman) contra el error de histéresis obtenido. Puede ser observado que para el rango medio los errores por histéresis son mayores, *i.e.*: valores entre 9-18 psi; errores entre 0,05-0,08 psi. Estos valores se encuentran dentro de los límites permitidos por la NTC 1420:2001, que para este caso particular equivale a 0,48 psi.

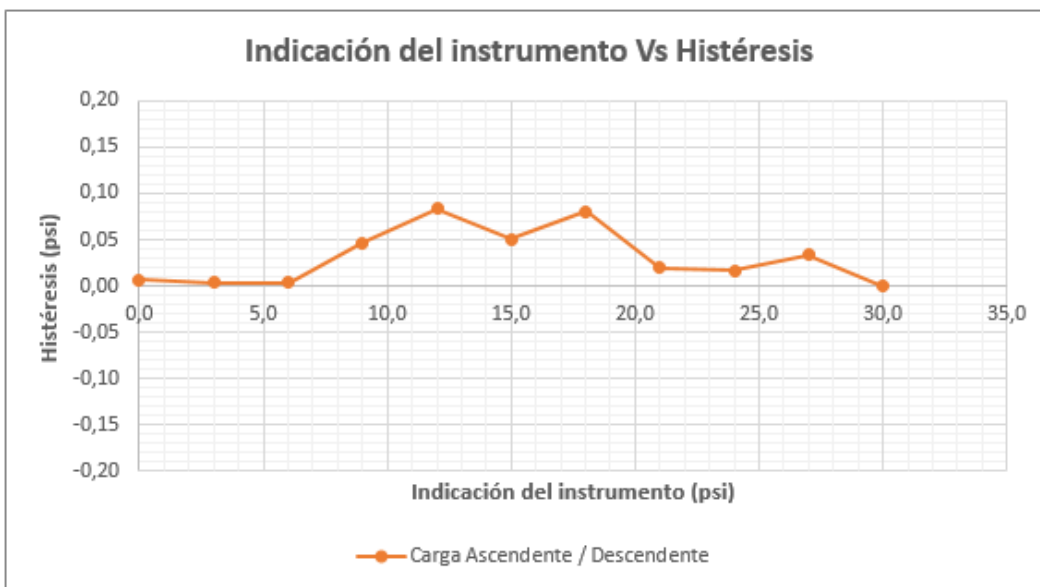


Figura 10. Manómetro Measureman: Gráfico de histéresis

Fuente: Autoría propia

Una vez estimados y verificados los errores por histéresis se procedió a obtener los distintos polinomios de ajuste (grado 1, 2, 3 y 4), mediante la aplicación del método de los mínimos cuadrados ordinarios. Una vez obtenidos tales polinomios, fue posible estimar la desviación media cuadrática –también llamada Incertidumbre de Ajuste– para establecer metrologicamente el más adecuado que caracteriza físicamente los datos experimentales obtenidos en la calibración.

Para el primer caso (Polinomio de grado 1) la Figura 11 muestra en el “eje x” la indicación el instrumento y en el “eje y” el valor indicado por el patrón de medición. Así mismo, es ilustrado el polinomio de ajuste obtenido.

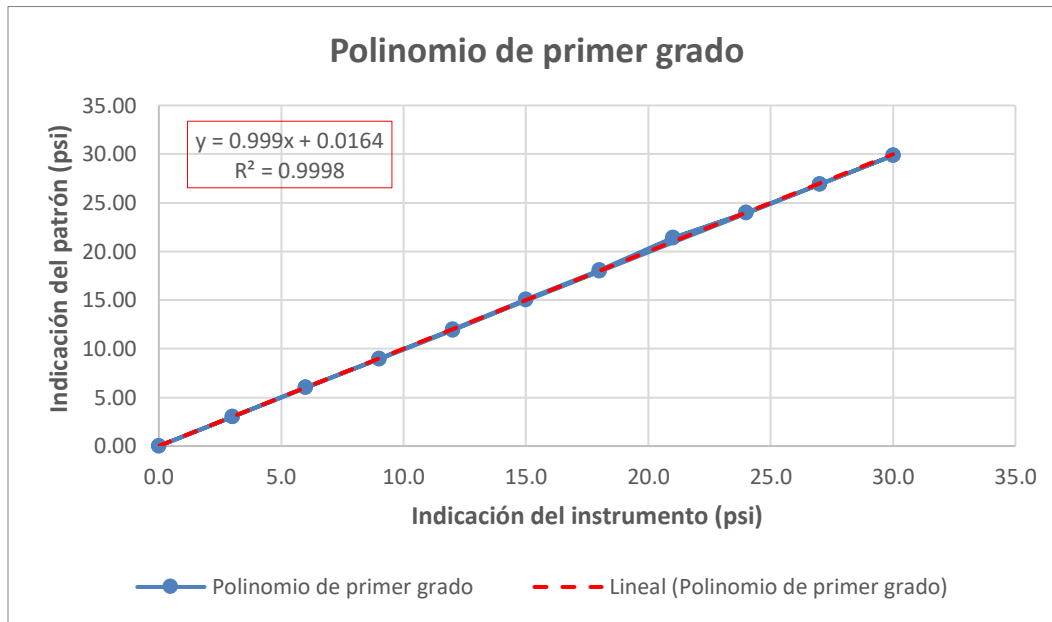


Figura 11. Manómetro Measureman: Polinomio de primer grado

Fuente: Autoría propia

La curva de calibración mostrada en la Figura 11 muestra que el polinomio de primer grado indica una buena concordancia entre los datos experimentales y la curva ajustada por: $y = 0,999x + 0,0164$. Esta concordancia es indicada por el valor del parámetro R^2 que corresponde a 99,98%. Ahora, se determina la desviación media cuadrática para conocer la incertidumbre asociada al ajuste y comparar este resultado con aquellos obtenidos por otros polinomios. La Tabla 9 muestra los resultados.

Tabla 9. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado uno

| POLINOMIO DE GRADO 1 | | | | | |
|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0,02 | 0,01 | 0,00009 | 0,0981 |
| 2 | 3,0 | 3,01 | 3,00 | 0,00014 | |
| 3 | 6,0 | 6,01 | 6,00 | 0,00008 | |
| 4 | 9,0 | 9,01 | 8,96 | 0,00257 | |
| 5 | 12,0 | 12,00 | 11,92 | 0,00684 | |
| 6 | 15,0 | 15,00 | 15,01 | 0,00001 | |
| 7 | 18,0 | 18,00 | 18,02 | 0,00047 | |
| 8 | 21,0 | 21,00 | 21,39 | 0,15571 | |
| 9 | 24,0 | 23,99 | 23,97 | 0,00058 | |
| 10 | 27,0 | 26,99 | 26,89 | 0,00923 | |
| 11 | 30,0 | 29,99 | 29,86 | 0,01683 | |

Para ejemplificar los datos de la tabla anterior, a continuación se desglosa la Ecuación 5 (Ver sección 3.2.1)²:

$$s = \sqrt{\frac{[(0,999 * 0,0 + 0,0164) - 0,01]^2 + \dots + [(0,999 * 30 + 0,0164) - 29,86]^2}{22 - 1 - 1}} = 0,0981 \quad (8)$$

Un proceso similar fue realizado para la obtención de la desviación media cuadrática de los Polinomios de grado 2, 3 y 4. En ese sentido la Figura 12 muestra el polinomio de ajuste obtenido para el segundo caso: Polinomio de grado 2.

² Para esta situación el número de puntos medidos es n = 22 y el grado del polinomio es m = 1.

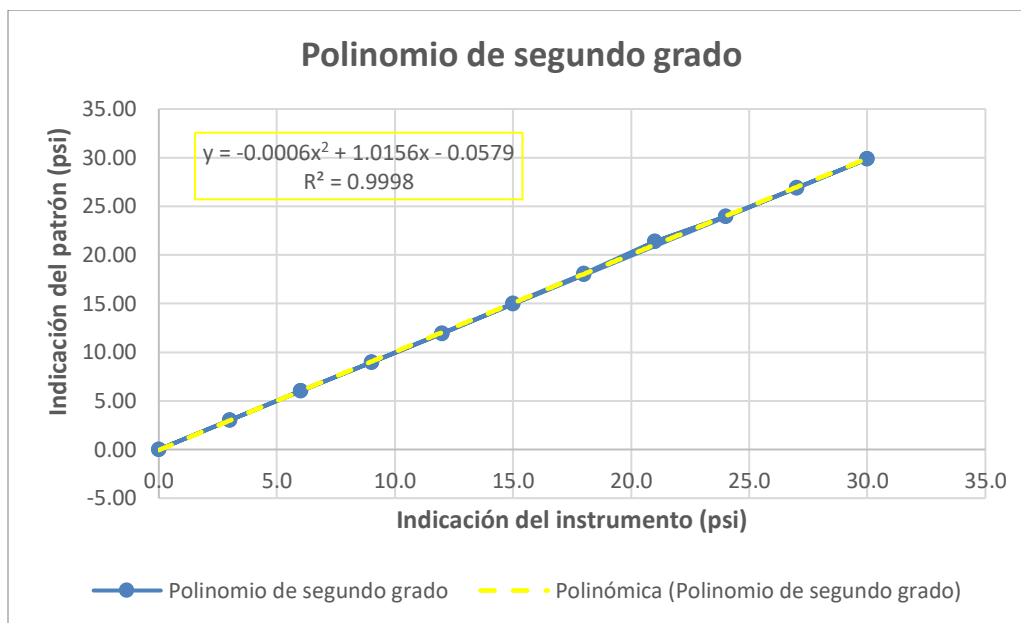


Figura 12. Manómetro Measureman: Polinomio de segundo grado

Fuente: Autoría propia

Al igual que para el caso de la curva de primer grado, la gráfica mostrada en la Figura 12 muestra que el polinomio de segundo grado indica una buena concordancia entre los datos experimentales y la curva ajustada, pues, el parámetro R^2 corresponde a 99,98%.

Aplicando la Ecuación 5, fue posible determinar la incertidumbre asociada al ajuste. A continuación, la Tabla 10 muestra los resultados obtenidos para esta situación donde fue evaluado un polinomio de segundo grado.

Tabla 10. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado dos

| POLINOMIO DE GRADO 2 | | | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | -0,06 | 0,01 | 0,00417 | 0,0963 |
| 2 | 3,0 | 2,98 | 3,00 | 0,00033 | |
| 3 | 6,0 | 6,01 | 6,00 | 0,00015 | |
| 4 | 9,0 | 9,03 | 8,96 | 0,00596 | |
| 5 | 12,0 | 12,04 | 11,92 | 0,01470 | |
| 6 | 15,0 | 15,04 | 15,01 | 0,00130 | |
| 7 | 18,0 | 18,03 | 18,02 | 0,00007 | |
| 8 | 21,0 | 21,01 | 21,39 | 0,14815 | |
| 9 | 24,0 | 23,97 | 23,97 | 0,00001 | |
| 10 | 27,0 | 26,93 | 26,89 | 0,00106 | |
| 11 | 30,0 | 29,87 | 29,86 | 0,00018 | |

Puede ser observado que el valor es 1,88% inferior al obtenido para un polinomio de grado uno. Esto confirma la importancia de evaluar polinomios de mayor grado, pues no necesariamente el mejor ajuste corresponde a una línea recta. Estos resultados pueden tomar mayor relevancia para mediciones que requieren de una alta confiabilidad metrológica.

Dando continuidad al análisis estadístico, se procede a evaluar un polinomio de tercer grado. La Figura 13 muestra el polinomio de ajuste obtenido para esta nueva situación que corresponde al Polinomio de grado 3.

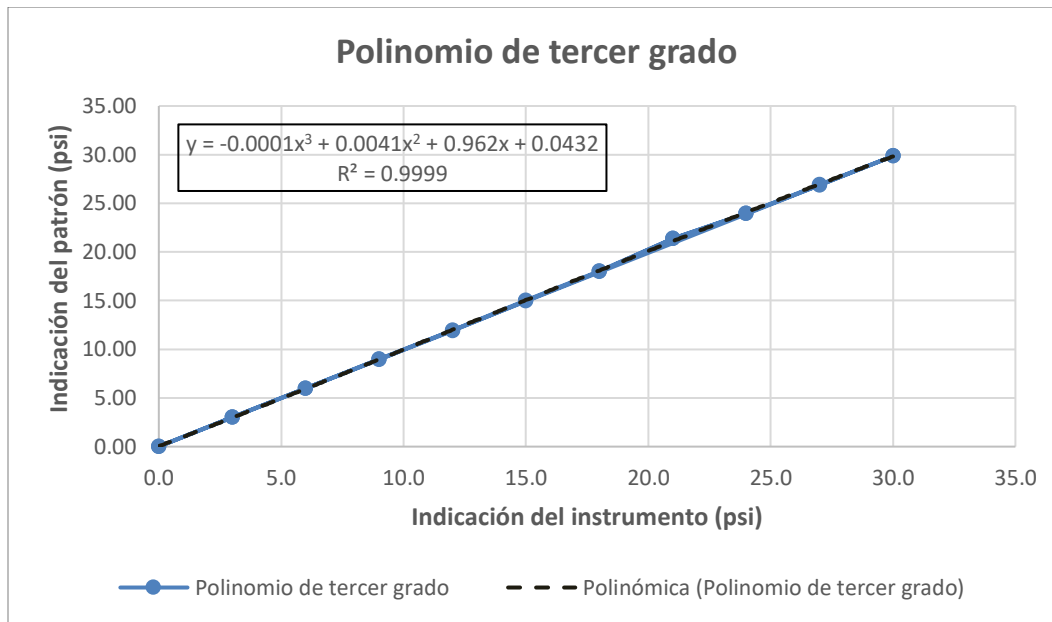


Figura 13. Manómetro Measureman: Polinomio de tercer grado

Fuente: Autoría propia

La figura anterior muestra que el polinomio de tercer grado indica una mayor concordancia entre los datos experimentales y la curva de ajuste, cuando comparado con los dos primeros casos: polinomios de grado uno y dos. Lo anterior es confirmado mediante el valor del parámetro R^2 que corresponde a 99,99%. Aplicando la Ecuación 5, se calculó la incertidumbre asociada al ajuste. La Tabla 11 ilustra los resultados obtenidos para el caso donde fue evaluado el polinomio de tercer grado.

Tabla 11. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado tres

| POLINOMIO DE GRADO 3 | | | | | |
|----------------------|-------------|----------|------------|----------------------|------------|
| Punto | Indicación | Presión | Indicación | (Ajus. - Ind. | Desviación |
| | Instrumento | ajustada | patrón | Patrón) ² | |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0,04 | 0,01 | 0,00133 | 0,0865 |
| 2 | 3,0 | 2,96 | 3,00 | 0,00146 | |
| 3 | 6,0 | 5,94 | 6,00 | 0,00366 | |
| 4 | 9,0 | 8,96 | 8,96 | 0,00001 | |
| 5 | 12,0 | 12,00 | 11,92 | 0,00691 | |
| 6 | 15,0 | 15,06 | 15,01 | 0,00283 | |
| 7 | 18,0 | 18,10 | 18,02 | 0,00712 | |
| 8 | 21,0 | 21,13 | 21,39 | 0,06906 | |
| 9 | 24,0 | 24,11 | 23,97 | 0,02018 | |
| 10 | 27,0 | 27,04 | 26,89 | 0,02087 | |
| 11 | 30,0 | 29,89 | 29,86 | 0,00133 | |

Puede ser observado en la tabla anterior que el valor es 11,81% inferior al obtenido para un polinomio de grado uno y 10,11% inferior cuando comparado con el polinomio de segundo grado. Lo anterior confirma, una vez más, la importancia de evaluar polinomios distintos al de primer grado, con el objetivo de reducir la incertidumbre asociada a la medición.

Finalmente, la Figura 14 muestra la curva de ajuste correspondiente a un polinomio de cuarto grado.

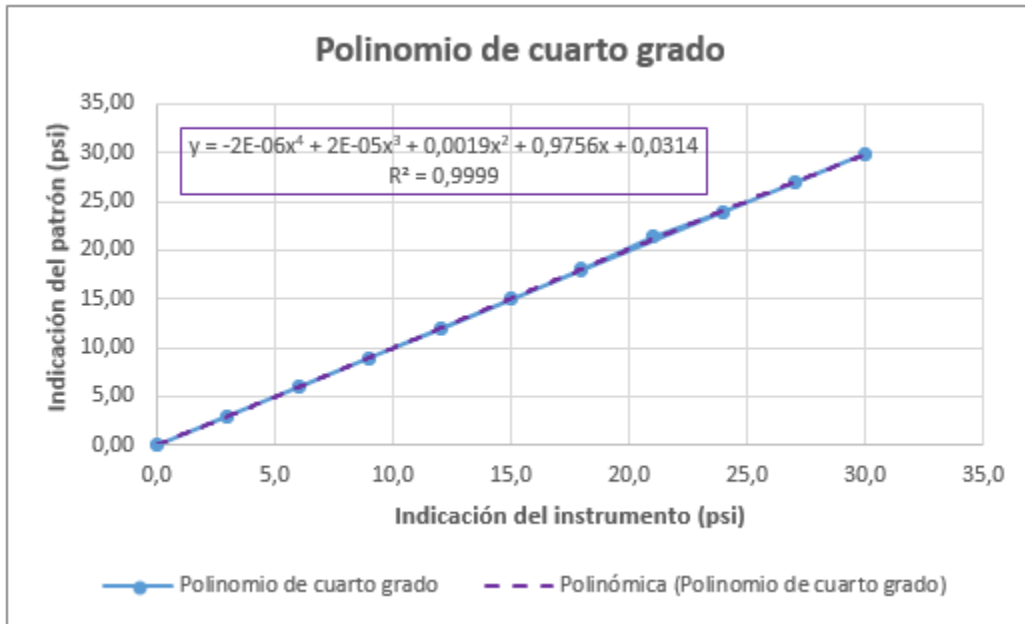


Figura 14. Manómetro Measureman: Polinomio de cuarto grado

Fuente: Autoría propia

Similar al caso anterior (polinomio de grado 3), la figura anterior muestra que el polinomio de cuarto grado indica una mayor concordancia entre los datos experimentales y la curva de ajuste, cuando comparado con los dos primeros casos (polinomios de grado uno y dos), una vez que el valor de R^2 corresponde a 99,99%. Aplicando la Ecuación 5, se calculó la incertidumbre asociada al ajuste. La Tabla 12 ilustra los resultados obtenidos para el caso donde fue evaluado el polinomio de cuarto grado.

Tabla 12. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado cuatro

| POLINOMIO DE GRADO 4 | | | | | |
|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0,03 | 0,01 | 0,00061 | 0,0958 |
| 2 | 3,0 | 2,98 | 3,00 | 0,00068 | |
| 3 | 6,0 | 5,96 | 6,00 | 0,00217 | |
| 4 | 9,0 | 8,97 | 8,96 | 0,00011 | |
| 5 | 12,0 | 12,01 | 11,92 | 0,00699 | |
| 6 | 15,0 | 15,06 | 15,01 | 0,00293 | |
| 7 | 18,0 | 18,11 | 18,02 | 0,00893 | |
| 8 | 21,0 | 21,15 | 21,39 | 0,05609 | |
| 9 | 24,0 | 24,15 | 23,97 | 0,03415 | |
| 10 | 27,0 | 27,09 | 26,89 | 0,03808 | |
| 11 | 30,0 | 29,93 | 29,86 | 0,00529 | |

A partir de los resultados de la tabla anterior, fue posible concluir: (i) a pesar que el parámetro R^2 es numéricamente igual para el caso del polinomio de grado 3, la incertidumbre asociada al ajuste es 9,68% mayor; (ii) cuando se compara el resultado de la incertidumbre ajuste con aquel obtenido por el polinomio de grado uno, se observa que es ligeramente mayor (2,36%) a aquella obtenida por el polinomio de grado cuatro; (iii) la incertidumbre de ajuste asociada al polinomio de grado cuatro es inferior a aquella obtenida por el polinomio de grado dos, en 0,48%.

La Tabla 13 resume las distintas incertidumbres de ajuste que son asociadas a los polinomios de grado uno, dos, tres y cuatro. De esta forma, para el caso del Manómetro Measureman, se atiende el segundo objetivo específico de la investigación: *calcular la desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste), para obtener el polinomio que caracteriza los datos experimentales con 95,0% de confiabilidad.*

Tabla 13. Resumen del cálculo de desviación media cuadrática

| Incertidumbre de ajuste (psi) | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| Grado 1 | Grado 2 | Grado 3 | Grado 4 |
| 0,0981 | 0,0963 | 0,0865 | 0,0958 |

En esta tabla se encuentra resaltada e menor desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste) que, para este caso en particular, corresponde a un **polinomio de tercer grado**, dado en forma general por la siguiente expresión:

$$y(x) = \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x + a_4 \quad (9)$$

Para el caso de evaluación metrológica en el Manómetro Measureman, los coeficientes corresponden a: $\alpha_1 = -0,0001$; $\alpha_2 = 0,0041$; $\alpha_3 = 0,962$; $\alpha_4 = 0,0432$. La variable "x" denota la indicación de presión del instrumento y la función "y(x)" denota la presión ajustada.

Una vez identificado el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales, fue posible calcular el error, la corrección y la incertidumbre expandida asociada a la medición de presión. La Tabla 19 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 14. Cálculo de error, corrección e incertidumbre expandida

| CARGA ASCENDENTE / DESCENDENTE | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|--------------------------|--------|--------|-----------|
| Puntos | Datos experimentales | | | | Cálculo de incertidumbre | | | |
| | Indicacion instrumento | Presión ajustada | Error Sistemático | Corrección | Instrumento | Patrón | Ajuste | Expandida |
| | psi | psi | psi | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0,04 | -0,04 | 0,04 | 0,1126 | 0,0030 | 0,0865 | 0,30 |
| 2 | 3,0 | 2,96 | 0,04 | -0,04 | 0,1126 | 0,0040 | 0,0865 | 0,30 |
| 3 | 6,0 | 5,94 | 0,06 | -0,06 | 0,1126 | 0,0040 | 0,0865 | 0,30 |
| 4 | 9,0 | 8,96 | 0,04 | -0,04 | 0,1126 | 0,0070 | 0,0865 | 0,30 |
| 5 | 12,0 | 12,00 | 0,00 | 0,00 | 0,1126 | 0,0070 | 0,0865 | 0,30 |
| 6 | 15,0 | 15,06 | -0,06 | 0,06 | 0,1126 | 0,0040 | 0,0865 | 0,30 |
| 7 | 18,0 | 18,10 | -0,10 | 0,10 | 0,1126 | 0,0050 | 0,0865 | 0,30 |
| 8 | 21,0 | 21,13 | -0,13 | 0,13 | 0,1126 | 0,0030 | 0,0865 | 0,30 |
| 9 | 24,0 | 24,11 | -0,11 | 0,11 | 0,1126 | 0,0070 | 0,0865 | 0,30 |
| 10 | 27,0 | 27,04 | -0,04 | 0,04 | 0,1126 | 0,0030 | 0,0865 | 0,30 |
| 11 | 30,0 | 29,89 | 0,11 | -0,11 | 0,1126 | 0,0030 | 0,0865 | 0,30 |

La tabla anterior compila los puntos experimentalmente obtenidos tanto para carga ascendente como para carga descendente. A continuación, se desglosa cada uno de los parámetros presentados en la Tabla 19:

Para la sección de Datos Experimentales.

- **Indicación del instrumento:** corresponde al valor indicado por el instrumento de medición al momento de la realización del experimento.
- **Presión ajustada:** denota el valor de presión obtenido a partir de la aplicación del polinomio de ajuste de tercer grado. A manera de ejemplo, a seguir se toma el primer punto experimental para mostrar el cálculo realizado. Cabe mencionar que, para los otros puntos experimentales, el procedimiento fue similar.

$$y(x) = \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x + a_4 \quad (10)$$

$$y(x) = -0,0001 \cdot (0,0)^3 + 0,0041 \cdot (0,0)^2 + 0,962 \cdot (0,0) + 0,0432$$

$$y(x) = 0,0432$$

$$y(x) = 0,04 \text{ psi}$$

- **Error sistemático (E) y Corrección (C):** el error sistemático denota la diferencia entre la indicación del instrumento y la presión ajustada. La corrección es definida como el negativo del error y representa el valor algebraico que debe ser sumado a la indicación del instrumento, para obtener el valor verdadero. Continuando con el ejemplo del primer punto experimental, a seguir se muestra el cálculo.

$$E = \text{indicación instrumento} - \text{presión ajustada}$$

$$E = 0,00 - 0,04 = -0,04 \text{ psi}$$

$$C = -E$$

$$C = -(-0,04) = 0,04 \text{ psi}$$

Para la sección de Cálculo de Incertidumbre.

- **Instrumento (u_{inst}):** denota la incertidumbre asociada al instrumento de medición. Siguiendo las recomendaciones de la ISO-GUM, la resolución del instrumento fue asociada a una distribución rectangular de probabilidad. Por tal motivo, fue tomado un cuarto de la resolución del instrumento y dividida por la raíz cuadrada de tres. Haciendo uso del polinomio de ajuste determinado y

considerando la hipótesis anterior, la incertidumbre asociada al instrumento de medición es dada por:

$$u_{inst} = \alpha_1 \left(\frac{res}{\sqrt{3}}\right)^3 + \alpha_2 \left(\frac{res}{\sqrt{3}}\right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{res}{\sqrt{3}}\right) + a_4 \quad (11)$$

Continuando con el ejemplo del primer punto experimental, a seguir se muestra el cálculo.

$$u_{inst} = -0,0001 \left(\frac{(0,5/4)}{\sqrt{3}}\right)^3 + 0,0041 \left(\frac{(0,5/4)}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0,962 \left(\frac{(0,5/4)}{\sqrt{3}}\right) + 0,0432$$

$$u_{inst} = 0,1126 \text{ psi}$$

Este valor es asociado al instrumento de medición, por la cual, es constante para todos los puntos experimentales medidos.

- **Patrón (u_p):** la incertidumbre asociada al patrón de medición se encuentra disponible en el certificado de calibración del mismo. Conforme indica el certificado, el factor de cobertura (k) es igual a $k=2$. Por tal motivo, para obtener la incertidumbre estándar es necesario dividir la incertidumbre expandida (U_p) reportada por dos. Este valor (incertidumbre expandida) varía según el rango en el cual se realice la medición, conforme indicado en el certificado de calibración. A continuación se expone da la expresión utilizada y se da seguimiento al ejemplo del primer punto experimental:

$$u_p = \frac{U_p}{2} \quad (12)$$

$$u_p = \frac{0,006 \text{ psi}}{2} = 0,0030 \text{ psi}$$

- **Ajuste (u_s):** la incertidumbre asociada al ajuste, corresponde a la menor desviación media cuadrática determinada a partir de la evaluación de los cuatro polinomios, *i.e.*: grado uno, dos, tres y cuatro. Para el caso particular del Manómetro Measureman, este valor es asociado al polinomio de grado tres y numéricamente es igual a: $u_s = 0,0865 \text{ psi}$.
- **Expandida (U_E):** este parámetro denota la incertidumbre asociada a la medición de presión para un nivel de confiabilidad determinado, que, para este caso específico, corresponde a 95,0%. El cálculo de la incertidumbre expandida fue realizado a partir de la siguiente expresión:

$$U_E = t \cdot (u_{inst}^2 + u_p^2 + u_s^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

El parámetro t corresponde al valor t -student, para un determinado nivel de confianza, que se encuentra tabulado en función de número de grado de libertad³: $\varphi = n - m - 1$. Para el caso particular del estudio del Manómetro Measureman, el número de grados de libertad fue calculado por:

$$\varphi = n - m - 1 = 22 - 3 - 1 = 18. \quad (14)$$

Para este valor de φ y una confiabilidad de 95,0%, el valor t -student equivale a $t = 2,1$.

Para el cálculo de la incertidumbre expandida asociada a la medición en los puntos experimentales, el procedimiento fue similar al descrito. A manera de ejemplificar, la incertidumbre expandida asociada a la medición para el primer punto experimental (Ecuación 13), se detalla a continuación:

$$U_E = 2,1 \cdot [(0,1126)^2 + (0,0030)^2 + (0,0865)^2]^{1/2}$$

$$U_E = 0,30 \text{ psi}$$

Los resultados para el estudio metrológico del Manómetro Measureman están alineados a los criterios establecidos por la NTC 1420:2001 que define los errores máximos permisibles para manómetros con clase de exactitud de 1,6% considerando el fondo de escala. Para este caso particular (Manómetro Measureman; Rango: 0 a 30 psi), el error máximo permisible es igual a 0,48 psi. Comparando este resultado con aquellos obtenidos por el Laboratorio de Metrología Acreditado que auxilió en el desarrollo de los experimentos, se confirma que ambos cumplen las exigencias normativas, pues la incertidumbre expandida reportada en el certificado equivale a valores que oscilan entre 0,20 y 0,21 psi. El valor encontrado por los investigadores es numéricamente mayor al certificado por el laboratorio. Uno de los motivos que explica esta situación es la incorporación de una fuente de incertidumbre

³ n : denota el número de puntos experimentales ($n=22$); m : denota el grado del polinomio de ajuste.

adicional que corresponde al ajuste por el método de los mínimos cuadrados ordinarios. Otra razón puede estar asociada a las hipótesis para la estimación de la incertidumbre asociada al instrumento de medición. Para el caso de asociar la resolución del instrumento a una distribución rectangular, el factor divisor equivale a $\sqrt{3} = 1,7321$. Para la situación donde es adoptada la hipótesis de una distribución triangular, el factor divisor equivale a $\sqrt{6} = 2,4495$. La ISO-GUM permite el uso de ambas hipótesis y su aplicación permite estimar en un mayor o menor grado la incertidumbre de medición. Para el caso particular de esta investigación se optó por asociar la distribución rectangular a la resolución del instrumento y, de esta forma, los resultados pueden ser considerados conservadores. En aras de disminuir la incertidumbre de medición por medio de la aplicación de una distribución triangular, es recomendable aplicar un test de hipótesis paramétrico y verificar que los datos experimentales, efectivamente, siguen una distribución triangular de probabilidad. Aplicar ese tipo de test estadístico no es el foco de la investigación. De esa forma, el método aquí propuesto conlleva a un aumento de la incertidumbre de medición sin afectar los requisitos normativos, es decir, a pesar de ligero aumento de la incertidumbre ésta se encuentra dentro de los límites permitidos por la NTC 1420:2001. En contrapartida, una vez que fue estimado el polinomio de ajuste, éste permite determinar los errores e incertidumbres asociados a la medición, para cualquier indicación del instrumento de medición, dentro de un nivel de confianza de 95,0%.

Para finalizar el análisis metrológico correspondiente al Manómetro Measureman, se presentan dos gráficos que auxilian en la identificación de errores, incertidumbres y presión ajustada. En ese sentido, la Figura 19 ilustra el error del instrumento junto con la incertidumbre expandida asociada a la medición (barras verticales), en función de la presión indicada por el instrumento.

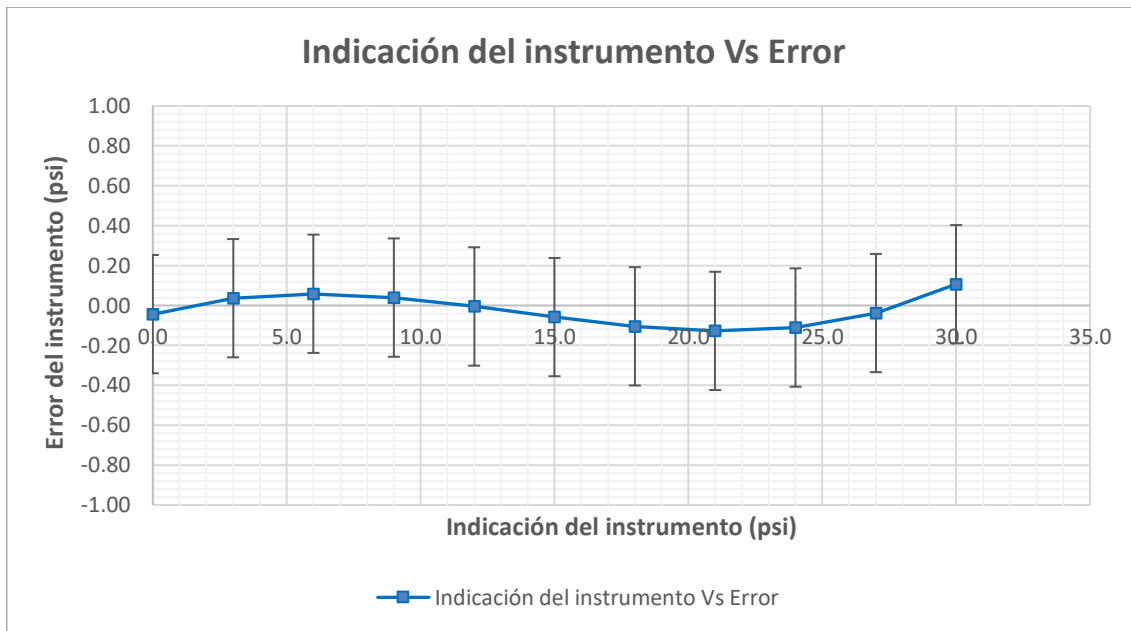


Figura 15. Manómetro Measureman: indicación del instrumento vs error

Fuente: Autoría propia

La Figura 20 muestra el valor del error para cada punto de presión ajustada. Así mismo, es mostrado el valor de la incertidumbre expandida asociada a la medición (barras verticales).

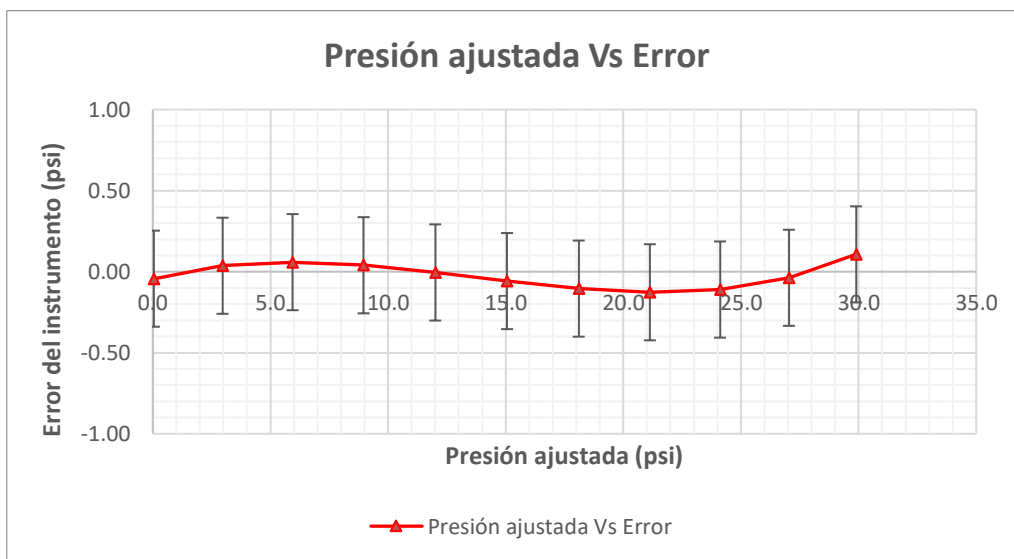


Figura 16. Manómetro Measureman: presión ajustada vs error

Fuente: Autoría propia

4.2 Manómetro Rockage

Las Tablas 15 a 17 muestran los datos obtenidos para el Manómetro Rockage. Para cada ciclo fueron medidos 22 puntos experimentales (11 para carga ascendente y 11 para carga descendente). De esa forma, 66 puntos fueron experimentalmente obtenidos.

Tabla 15. Manómetro Rockage: Ciclo 1

| CICLO 1 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 2 | 10,1 | 10 | 9,3 | 10 |
| 3 | 19,7 | 20 | 19,2 | 20 |
| 4 | 30,4 | 30 | 30,3 | 30 |
| 5 | 39,8 | 40 | 39,4 | 40 |
| 6 | 50,1 | 50 | 50,1 | 50 |
| 7 | 60,1 | 60 | 59,5 | 60 |
| 8 | 70,3 | 70 | 70,0 | 70 |
| 9 | 80,0 | 80 | 79,6 | 80 |
| 10 | 90,4 | 90 | 90,1 | 90 |
| 11 | 99,4 | 100 | 99,4 | 100 |

Tabla 16. Manómetro Rockage: Ciclo 2

| CICLO 2 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 2 | 10,1 | 10 | 9,3 | 10 |
| 3 | 19,7 | 20 | 19,2 | 20 |
| 4 | 30,2 | 30 | 30,3 | 30 |
| 5 | 39,8 | 40 | 39,4 | 40 |
| 6 | 50,1 | 50 | 50,1 | 50 |
| 7 | 60,3 | 60 | 59,5 | 60 |
| 8 | 70,1 | 70 | 70,2 | 70 |
| 9 | 80,0 | 80 | 79,8 | 80 |
| 10 | 90,4 | 90 | 90,1 | 90 |
| 11 | 99,4 | 100 | 99,4 | 100 |

Tabla 17. Manómetro Rockage: Ciclo 3

| CICLO 3 | | | | |
|---------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento |
| | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 2 | 10,1 | 10 | 10,1 | 10 |
| 3 | 20,2 | 20 | 20,0 | 20 |
| 4 | 30,3 | 30 | 30,2 | 30 |
| 5 | 39,9 | 40 | 40,2 | 40 |
| 6 | 50,2 | 50 | 50,4 | 50 |
| 7 | 60,2 | 60 | 60,1 | 60 |
| 8 | 70,3 | 70 | 70,0 | 70 |
| 9 | 80,1 | 80 | 80,1 | 80 |
| 10 | 90,2 | 90 | 90,2 | 90 |
| 11 | 99,4 | 100 | 99,5 | 100 |

Una vez adquirido los datos experimentales, se procedió a realizar los cálculos pertinentes cálculos estadísticos. La Tabla 18 presenta la estimación de los valores medios para carga ascendente y descendente, así como el cálculo de error de histéresis.

Tabla 18. Estimación de valores de medios en la calibración

| Valores medios | | | | | |
|----------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|------------|
| Puntos | Carga Ascendente | | Carga Descendente | | Histéresis |
| | Patrón | Instrumento | Patrón | Instrumento | |
| | psi | psi | psi | psi | |
| 1 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,00 |
| 2 | 10,1 | 10 | 9,6 | 10 | 0,53 |
| 3 | 19,9 | 20 | 19,5 | 20 | 0,40 |
| 4 | 30,3 | 30 | 30,3 | 30 | 0,03 |
| 5 | 39,8 | 40 | 39,7 | 40 | 0,17 |
| 6 | 50,1 | 50 | 50,2 | 50 | 0,07 |
| 7 | 60,2 | 60 | 59,7 | 60 | 0,50 |
| 8 | 70,2 | 70 | 70,1 | 70 | 0,17 |
| 9 | 80,0 | 80 | 79,8 | 80 | 0,20 |
| 10 | 90,3 | 90 | 90,1 | 90 | 0,20 |
| 11 | 99,4 | 100 | 99,4 | 100 | 0,03 |

En la sección anterior se detalló el algoritmo que fue aplicado para la obtención de los resultados. Para el caso de la Tabla 18 el procedimiento matemático fue similar. A partir de los resultados de la Tabla 18 fue posible graficar el error de histéresis para cada indicación del Manómetro Rockage. La Figura 17 ilustra la esta situación.

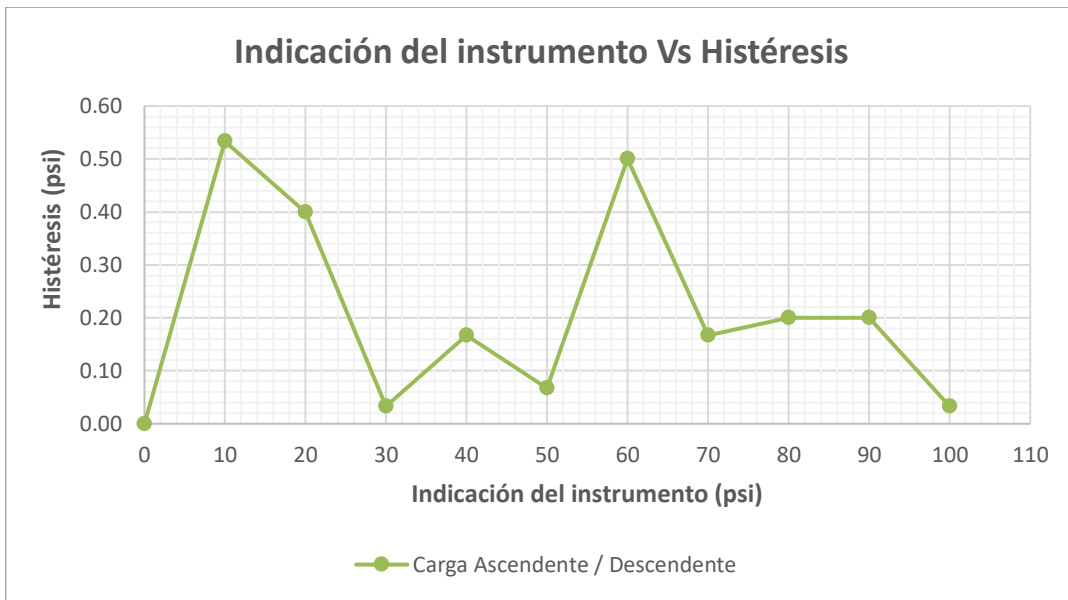


Figura 17. Manómetro Rockage: Gráfico de histéresis

Fuente: Autoría propia

El gráfico anterior muestra que el error de histéresis es menor a 1,6 psi que corresponde al límite máximo permitido por la NTC 1420:2001 para manómetros con clase de exactitud de 1,6%. De esta forma, se constató que el error de histéresis atiende los requisitos de la normatividad aplicada. A seguir se evalúan los cuatros polinomios (grado 1, 2, 3 y 4) y, posteriormente, se establece aquel que mejor modela los datos. La Figura 18 muestra la curva de ajuste y el polinomio de primer grado obtenido.

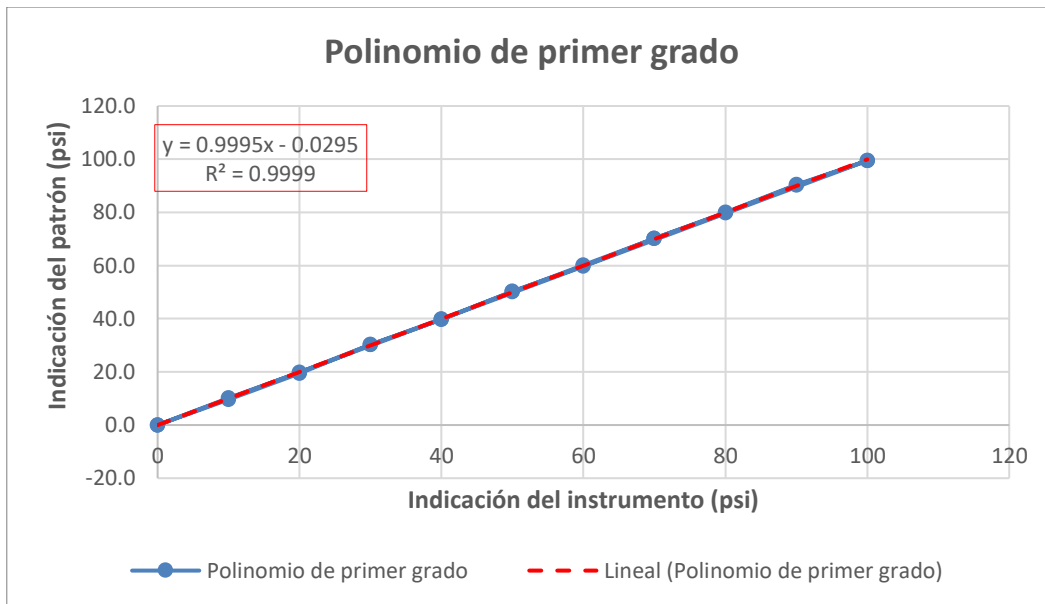


Figura 18. Manómetro Rockage: Polinomio de primer grado

Fuente: Autoría propia

Considerando los datos experimentales y , aplicando la Ecuación 5, fue posible calcular la desviación media cuadrática. La Tabla 19 presenta los resultados.

Tabla 19. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado uno

| POLINOMIO DE GRADO 1 | | | | | |
|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | -0,03 | 0,00 | 0,00087 | 0,1865 |
| 2 | 10,0 | 9,97 | 9,83 | 0,01747 | |
| 3 | 20,0 | 19,96 | 19,67 | 0,08634 | |
| 4 | 30,0 | 29,96 | 30,28 | 0,10747 | |
| 5 | 40,0 | 39,95 | 39,75 | 0,04020 | |
| 6 | 50,0 | 49,95 | 50,17 | 0,04891 | |
| 7 | 60,0 | 59,94 | 59,95 | 0,00009 | |
| 8 | 70,0 | 69,94 | 70,15 | 0,04601 | |
| 9 | 80,0 | 79,93 | 79,93 | 0,00001 | |
| 10 | 90,0 | 89,93 | 90,23 | 0,09476 | |
| 11 | 100,0 | 99,92 | 99,42 | 0,25385 | |

Para ejemplificar los datos de la tabla anterior, a continuación se desglosa la Ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{[(0,9995 \cdot 0,0 - 0,0295) - 0,00]^2 + \dots + [(0,9995 \cdot 0,0 - 0,0295) - 99,42]^2}{22 - 1 - 1}} = 0,1865 \quad (15)$$

Una vez finalizado el análisis para el polinomio de primer grado, se procedió a realizar lo propio para la situación del polinomio de segundo grado. La Figura 19 ilustra la curva de ajuste para esta nueva situación.

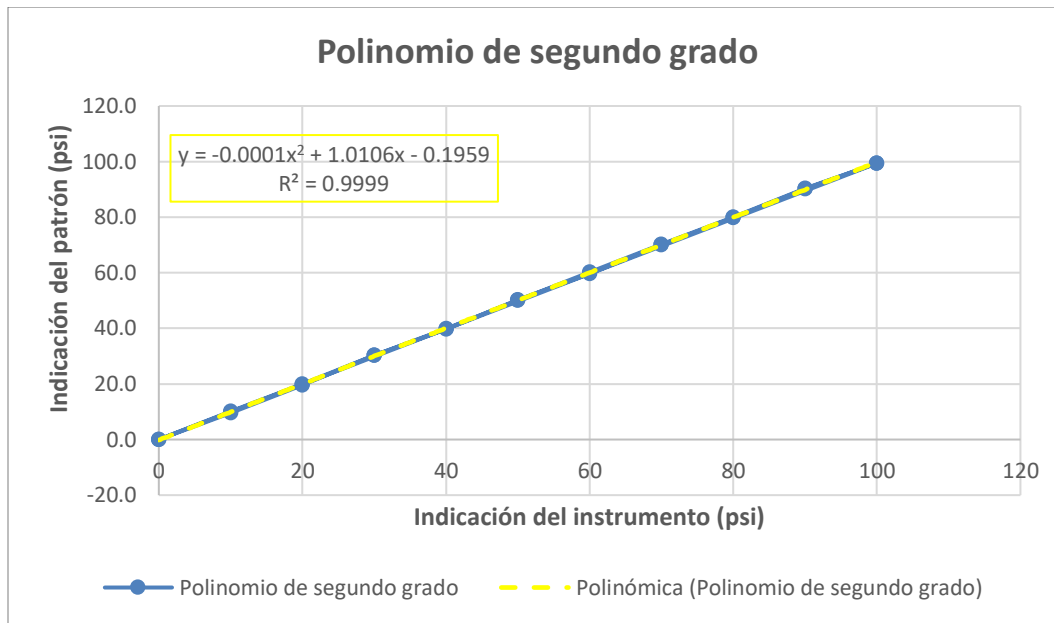


Figura 19. Manómetro Rockage: Polinomio de segundo grado

Fuente: Autoría propia

Aplicando nuevamente la Ecuación 5, fue posible determinar la desviación media cuadrática. La Tabla 20 muestra los resultados obtenidos para esta situación donde fue evaluado un polinomio de segundo grado.

Tabla 20. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado dos

| POLINOMIO DE GRADO 2 | | | | | |
|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | -0,20 | 0,00 | 0,03838 | 0,1811 |
| 2 | 10,0 | 9,90 | 9,83 | 0,00446 | |
| 3 | 20,0 | 19,98 | 19,67 | 0,09575 | |
| 4 | 30,0 | 30,03 | 30,28 | 0,06312 | |
| 5 | 40,0 | 40,07 | 39,75 | 0,10119 | |
| 6 | 50,0 | 50,08 | 50,17 | 0,00682 | |
| 7 | 60,0 | 60,08 | 59,95 | 0,01693 | |
| 8 | 70,0 | 70,06 | 70,15 | 0,00882 | |
| 9 | 80,0 | 80,01 | 79,93 | 0,00620 | |
| 10 | 90,0 | 89,95 | 90,23 | 0,08136 | |
| 11 | 100,0 | 99,86 | 99,42 | 0,20020 | |

Puede ser observado que el valor es inferior (2,91%) a aquel obtenido con el polinomio de primer grado 1, lo que confirma –una vez más– que en todos los casos, el mejor ajuste polinomial no corresponde a una línea recta.

A seguir, son presentados los resultados para el análisis del polinomio de tercer grado. La Figura 20 ilustra la curva de ajuste para esta nueva situación.

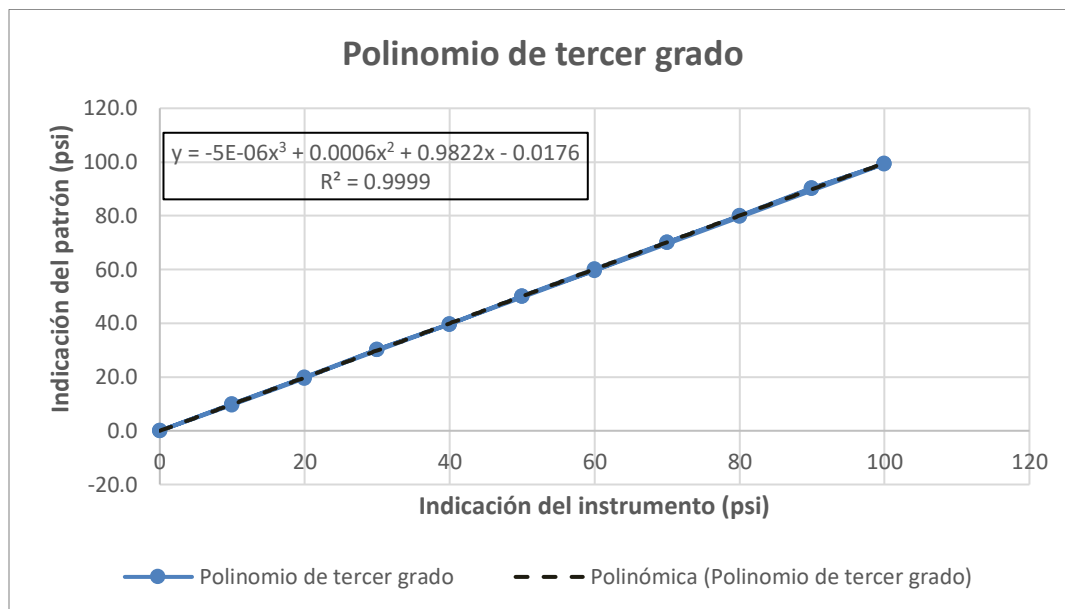


Figura 20. Manómetro Rockage: Polinomio de tercer grado

Fuente: Autoría propia

A seguir, la Tabla 21 presenta los resultados obtenidos para la desviación media cuadrática.

Tabla 21. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado tres

| POLINOMIO DE GRADO 3 | | | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | -0,02 | 0,00 | 0,00031 | 0,2077 |
| 2 | 10,0 | 9,86 | 9,83 | 0,00068 | |
| 3 | 20,0 | 19,83 | 19,67 | 0,02551 | |
| 4 | 30,0 | 29,85 | 30,28 | 0,18484 | |
| 5 | 40,0 | 39,91 | 39,75 | 0,02573 | |
| 6 | 50,0 | 49,97 | 50,17 | 0,03971 | |
| 7 | 60,0 | 59,99 | 59,95 | 0,00197 | |
| 8 | 70,0 | 69,96 | 70,15 | 0,03557 | |
| 9 | 80,0 | 79,84 | 79,93 | 0,00901 | |
| 10 | 90,0 | 89,60 | 90,23 | 0,40696 | |
| 11 | 100,0 | 99,20 | 99,42 | 0,04591 | |

Comparando este valor de incertidumbre de ajuste (0,2077 psi) con aquel obtenido aplicando el polinomio de primer grado (0,1865 psi), se observa que es 10,17% superior. Al mismo tiempo, comparando la incertidumbre de ajuste obtenida a partir de polinomio de tercer grado con aquel valor obtenido para el polinomio de segundo grado (0,1811 psi), se observa que éste último (polinomio de segundo grado) es 12,79% superior. A seguir se evalúa el polinomio de cuarto grado para establecer el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales. La Figura 21 muestra la curva de ajuste correspondiente a un polinomio de cuarto grado.

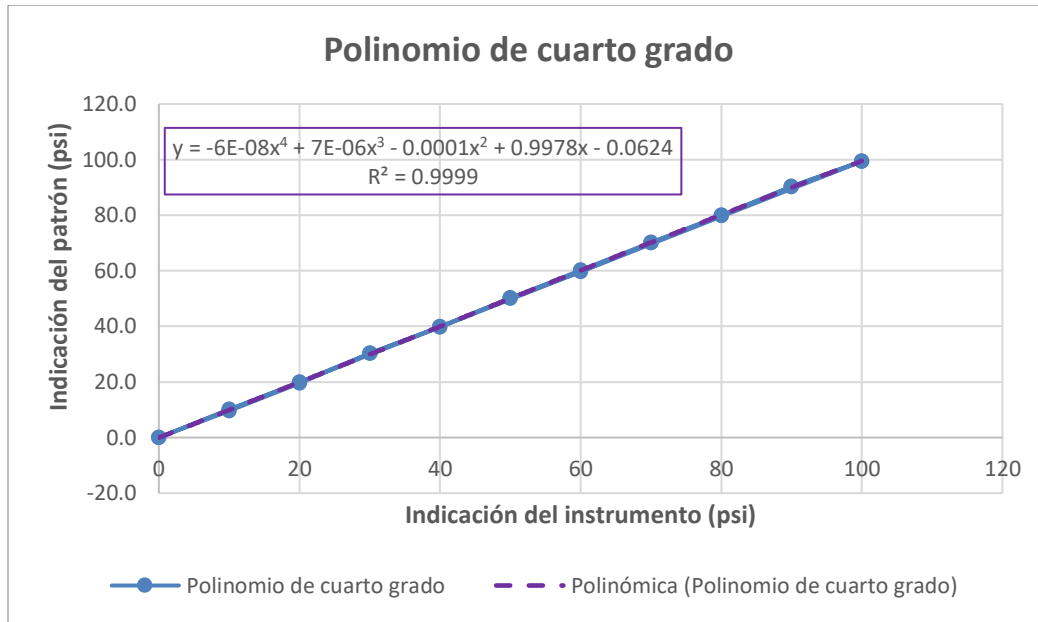


Figura 21. Manómetro Rockage: Polinomio de cuarto grado

Fuente: Autoría propia

A partir de los pares experimentales (x, y: instrumento, patrón) y, aplicando la Ecuación 5 (Ver sección 3.2.1)⁴, se calculó la incertidumbre asociada al ajuste. La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos para esta última situación: polinomio de cuarto grado.

⁴ Para esta situación el número de puntos medidos es $n = 22$ y el grado del polinomio es $m = 4$.

Tabla 22. Cálculo de desviación media cuadrática: Polinomio de grado cuatro

| POLINOMIO DE GRADO 4 | | | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Punto | Indicación Instrumento | Presión ajustada | Indicación patrón | (Ajus. - Ind. Patrón) ² | Desviación media cuadrática |
| | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0,0 | -0,06 | 0,00 | 0,00389 | 0,1766 |
| 2 | 10,0 | 9,91 | 9,83 | 0,00619 | |
| 3 | 20,0 | 19,90 | 19,67 | 0,05444 | |
| 4 | 30,0 | 29,92 | 30,28 | 0,13056 | |
| 5 | 40,0 | 39,98 | 39,75 | 0,05476 | |
| 6 | 50,0 | 50,08 | 50,17 | 0,00793 | |
| 7 | 60,0 | 60,18 | 59,95 | 0,05290 | |
| 8 | 70,0 | 70,25 | 70,15 | 0,01082 | |
| 9 | 80,0 | 80,25 | 79,93 | 0,09902 | |
| 10 | 90,0 | 90,10 | 90,23 | 0,01886 | |
| 11 | 100,0 | 99,72 | 99,42 | 0,09056 | |

Realizando un cuadro comparativo de la incertidumbre de ajuste asociada a un polinomio de cuarto grado, con aquellas obtenidas para polinomios de menor grado, se afirman las siguientes consideraciones:

- con relación a la incertidumbre de ajuste para el polinomio de primer grado (0,1865 psi), es 5,35% mayor a aquella asociada al polinomio de cuarto grado (0,1766 psi);
- con relación a la incertidumbre de ajuste para el polinomio de segundo grado (0,1811 psi), es 2,51% mayor a aquella asociada al polinomio de cuarto grado (0,1766 psi);
- con relación a la incertidumbre de ajuste para el polinomio de tercer grado (0,2077 psi), es 14,98% mayor a aquella asociada al polinomio de cuarto grado (0,1766 psi);

en ese orden de ideas, para el caso del Manómetro Rockage, el polinomio que caracteriza el mejor ajuste de los datos experimentales, corresponden a un ecuación de cuarto grado. La Tabla 23 resume las distintas incertidumbres de ajuste que son asociadas a los polinomios de grado uno, dos, tres y cuatro. De esta forma, para el caso del Manómetro Rockage, se atiende el segundo objetivo específico de la investigación: *calcular la*

desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste), para obtener el polinomio que caracteriza los datos experimentales con 95,0% de confiabilidad.

Tabla 23. Resumen del cálculo de desviación media cuadrática

| Incertidumbre de ajuste (psi) | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| Grado 1 | Grado 2 | Grado 3 | Grado 4 |
| 0,1865 | 0,1811 | 0,2077 | 0,1766 |

En esta tabla se encuentra resaltada la menor desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste) confirmando que corresponde a un **polinomio de cuarto grado**, dado en forma general por la siguiente expresión:

$$y(x) = \alpha_1 x^4 + \alpha_2 x^3 + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x + \alpha_5 \quad (16)$$

Para el caso de evaluación metrológica en el Manómetro #2, los coeficientes corresponden a: $\alpha_1 = -6 \times 10^{-8}$; $\alpha_2 = 7 \times 10^{-6}$; $\alpha_3 = -0,0001$; $\alpha_4 = 0,9978$; $\alpha_5 = -0,0624$. La variable "x" denota la indicación de presión del instrumento y la función "y(x)" denota la presión ajustada.

Una vez identificado el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales, fue posible calcular el error, la corrección y la incertidumbre expandida asociada a la medición de presión. La Tabla 49 muestra los resultados obtenidos. Así, se atiende el tercer objetivo específico de la investigación para el caso particular del Manómetro Rockage: *Estimar la incertidumbre asociada a los controladores de presión, con el propósito de definir un intervalo donde oscila el valor verdadero de la medición, para un nivel de confianza de 95,0%.*

Tabla 24. Cálculo de error, corrección e incertidumbre expandida

| CARGA ASCENDENTE / DESCENDENTE | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|--------------------------|--------|--------|-----------|
| Puntos | Datos experimentales | | | | Cálculo de incertidumbre | | | |
| | Indicación instrumento | Presión ajustada | Error Sistemático | Corrección | Instrumento | Patrón | Ajuste | Expandida |
| | psi | psi | psi | psi | psi | psi | psi | psi |
| 1 | 0 | -0,1 | 0,1 | -0,1 | 0,2256 | 0,0555 | 0,1766 | 0,61 |
| 2 | 10 | 9,9 | 0,1 | -0,1 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 3 | 20 | 19,9 | 0,1 | -0,1 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 4 | 30 | 29,9 | 0,1 | -0,1 | 0,2256 | 0,0615 | 0,1766 | 0,61 |
| 5 | 40 | 40,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2256 | 0,0690 | 0,1766 | 0,61 |
| 6 | 50 | 50,1 | -0,1 | 0,1 | 0,2256 | 0,0670 | 0,1766 | 0,61 |
| 7 | 60 | 60,2 | -0,2 | 0,2 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 8 | 70 | 70,3 | -0,3 | 0,3 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 9 | 80 | 80,2 | -0,2 | 0,2 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 10 | 90 | 90,1 | -0,1 | 0,1 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |
| 11 | 100 | 99,7 | 0,3 | -0,3 | 0,2256 | 0,0600 | 0,1766 | 0,61 |

La tabla anterior resume los puntos experimentalmente obtenidos tanto para carga ascendente como para carga descendente. A continuación, se detalla cada uno de los parámetros presentados en la Tabla 49:

Para la sección de Datos Experimentales.

- **Indicación del instrumento:** corresponde al valor indicado por el instrumento de medición al momento de la realización del experimento.
- **Presión ajustada:** denota el valor de presión obtenido a partir de la aplicación del polinomio de ajuste de tercer grado. A manera de ejemplo, a seguir se toma el primer punto experimental para mostrar el cálculo realizado. Cabe mencionar que, para los otros puntos experimentales, el procedimiento fue similar.

$$y(x) = \alpha_1 x^4 + \alpha_2 x^3 + \alpha_3 x^2 + a_4 x + a_5 \quad (17)$$

$$y(x) = -6 \times 10^{-8} \cdot (0)^4 + 7 \times 10^{-6} \cdot (0)^3 - 0,0001 \cdot (0)^2 + 0,9978 \cdot (0) - 0,0624$$

$$y(x) = -0,0624$$

$$y(x) = -0,1 \text{ psi}$$

- **Error sistemático (E) y Corrección (C):** el error sistemático denota la diferencia entre la indicación del instrumento y la presión ajustada. La corrección es definida como el negativo del error y representa el valor

algebraico que debe ser sumado a la indicación del instrumento, para obtener el valor verdadero. Continuando con el ejemplo del primer punto experimental, a seguir se muestra el cálculo.

$$E = \text{indicación instrumento} - \text{presión ajustada} \quad (18)$$

$$E = 0 - 0,1 = -0,1 \text{ psi}$$

$$C = -E$$

$$C = -(-0,1) = 0,1 \text{ psi}$$

Para la sección de Cálculo de Incertidumbre.

- **Instrumento (u_{inst}):** denota la incertidumbre asociada al instrumento de medición. Siguiendo las recomendaciones de la ISO-GUM, la resolución del instrumento fue asociada a una distribución rectangular de probabilidad. Por tal motivo, fue tomado un cuarto de la resolución del instrumento y dividida por la raíz cuadrada de tres. Haciendo uso del polinomio de ajuste determinado y considerando la hipótesis anterior, la incertidumbre asociada al instrumento de medición es dada por:

$$u_{inst} = \alpha_1 \left(\frac{res}{\sqrt{3}} \right)^4 + \alpha_2 \left(\frac{res}{\sqrt{3}} \right)^3 + \alpha_3 \left(\frac{res}{\sqrt{3}} \right)^2 + \alpha_4 \left(\frac{res}{\sqrt{3}} \right) + a_5 \quad (19)$$

Continuando con el ejemplo del primer punto experimental, a seguir se muestra el cálculo.

$$u_{inst} = -6 \times 10^{-8} \left(\frac{(2/4)}{\sqrt{3}} \right)^4 - 7 \times 10^{-6} \left(\frac{(2/4)}{\sqrt{3}} \right)^3 - 0,0001 \left(\frac{(2/4)}{\sqrt{3}} \right)^2 \\ + 0,9978 \left(\frac{(2/4)}{\sqrt{3}} \right) - 0,0624$$

$$u_{inst} = 0,2256 \text{ psi}$$

Este valor es asociado al instrumento de medición, por la cual, es constante para todos los puntos experimentales medidos.

- **Patrón (u_p):** la incertidumbre asociada al patrón de medición se encuentra disponible en el certificado de calibración del mismo. Este instrumento patrón fue el mismo utilizado para la calibración del Manómetro #2 y #3. De esa forma, la incertidumbre de medición asociada al patrón es dada por:

$$u_p = \frac{U_p}{2} \quad (20)$$

$$u_p = \frac{0,111 \text{ psi}}{2} = 0,0555 \text{ psi}$$

- **Ajuste (u_s):** la incertidumbre asociada al ajuste, corresponde a la menor desviación media cuadrática determinada a partir de la evaluación de los cuatro polinomios, *i.e.*: grado uno, dos, tres y cuatro. Para el caso particular del Manómetro Rockage, este valor es asociado al polinomio de grado cuatro y numéricamente es igual a: $u_s = 0,1766 \text{ psi}$.
- **Expandida (U_E):** este parámetro denota la incertidumbre asociada a la medición de presión para un nivel de confiabilidad determinado, que, para este caso específico, corresponde a 95,0%. El cálculo de la incertidumbre expandida fue realizado a partir de la siguiente expresión:

$$U_E = t \cdot (u_{inst}^2 + u_p^2 + u_s^2)^{1/2} \quad (21)$$

El parámetro t corresponde al valor *t-student*, para un determinado nivel de confianza, que se encuentra tabulado en función de número de grado de libertad⁵: $\varphi = n - m - 1$. Para el caso particular del estudio del Manómetro #2, el número de grados de libertad fue calculado por:

$$\varphi = n - m - 1 = 22 - 4 - 1 = 17. \quad (22)$$

Para este valor de φ y una confiabilidad de 95,0%, el valor *t-student* equivale a $t = 2,1$. Para el cálculo de la incertidumbre expandida asociada a la medición en los puntos experimentales, el procedimiento fue similar al descrito. A manera de ejemplificar (Ecuación 37), la incertidumbre expandida asociada a la medición para el primer punto experimental, se detalla a continuación:

$$U_E = 2,1 \cdot [(0,2256)^2 + (0,0555)^2 + (0,1766)^2]^{1/2}$$
$$U_E = 0,61 \text{ psi}$$

Los resultados para el estudio metrológico del Manómetro Rockage están alineados a los criterios establecidos por la NTC 1420:2001 que define los

⁵ **n**: denota el número de puntos experimentales ($n=22$); **m**: denota el grado del polinomio de ajuste.

errores máximos permisibles para manómetros con clase de exactitud de 1,6% considerando el fondo de escala. Para este caso particular (Manómetro Rockage; Rango: 0 a 100 psi), el error máximo permisible es igual a 1,60 psi, se confirma que ambos cumplen las exigencias normativas, pues la incertidumbre expandida reportada en el certificado equivale a valores que oscilan entre 0,63 y 0,76 psi. En este caso particular, la incertidumbre asociada a la medición de presión con el Manómetro Rockage, fue inferior a aquel valor reportado por el Laboratorio de Metrología. Al igual que en los casos de los manómetros evaluados en las secciones anteriores, tanto la evaluación metrológica realizada por los investigadores del presente proyecto, así como aquellos valores reportados por el Laboratorio de Metrología, atiende cabalmente los errores máximos permitidos por la NTC 1420:2001, para manómetros de clase de exactitud de 1,6%, que para este caso particular corresponde a 1,6 psi. Adicionalmente, vale la pena resaltar que el punto diferencial de la aplicación del método de los mínimos cuadrados ordinarios aquí desarrollado, éste permite determinar los errores e incertidumbres asociados a la medición, para cualquier indicación del instrumento de medición, dentro de un nivel de confianza de 95,0%.

Para finalizar el análisis metrológico correspondiente al Manómetro Rockage, se presentan dos gráficos que auxilian en la identificación de errores, incertidumbres y presión ajustada. La Figura 22 ilustra el error del instrumento junto con la incertidumbre expandida asociada a la medición (barras verticales), en función de la presión indicada por el instrumento.

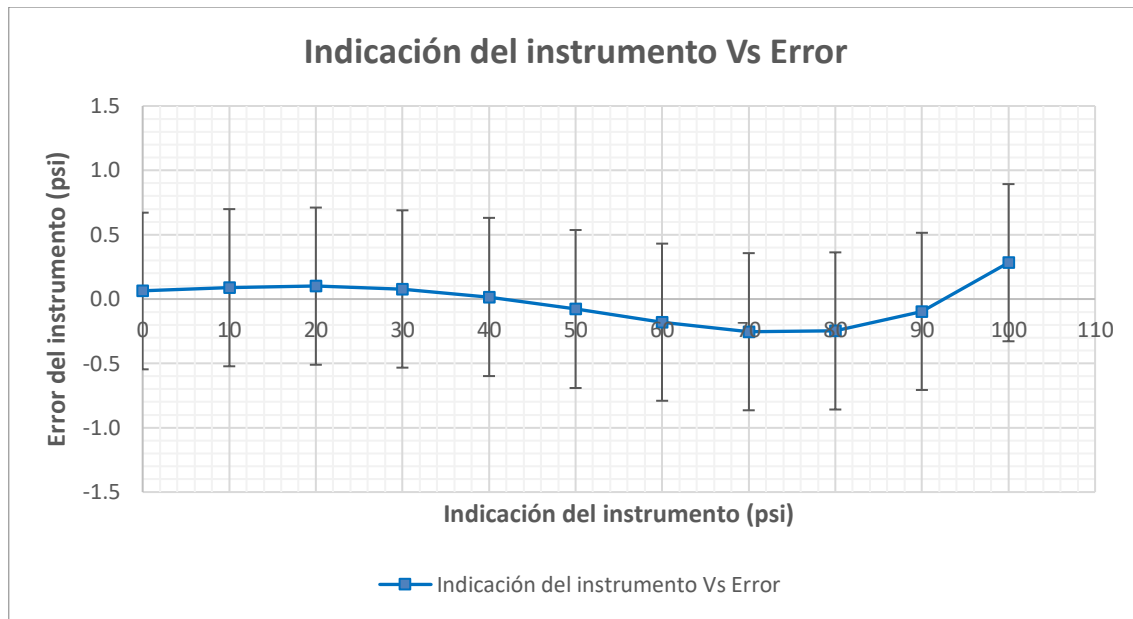


Figura 22. Manómetro Rockage: indicación del instrumento vs error

Fuente: Autoría propia

La Figura 23 muestra el valor del error para cada punto de presión ajustada. Así mismo, es mostrado el valor de la incertidumbre expandida asociada a la medición (barras verticales).

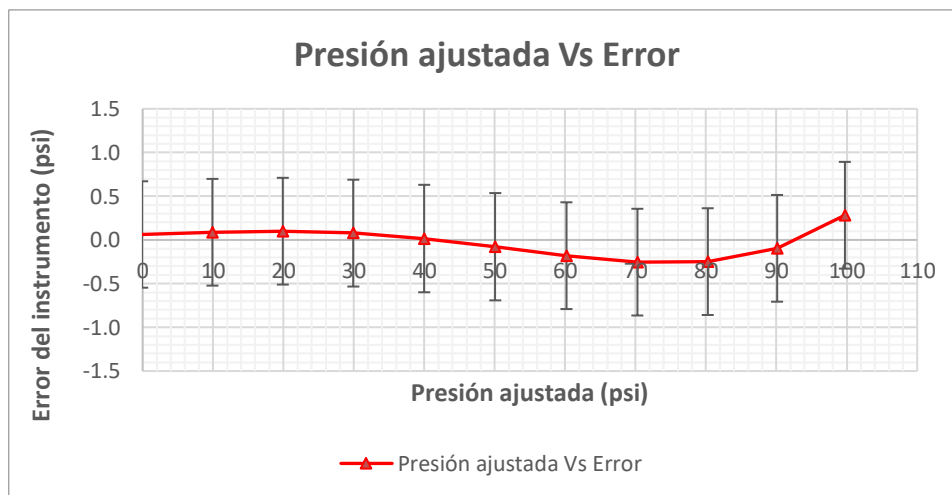


Figura 23. Manómetro Rockage: presión ajustada vs error

Fuente: Autoría propia

5. Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo hace mención a las principales conclusiones y recomendaciones del proyecto de grado investigativo en función de los resultados obtenidos y detallados en el capítulo anterior. Cuatro son las principales conclusiones, las cuales le dan respuesta a cada objetivo específico formulado en el capítulo uno.

- (i) Se gestionó la calibración y certificación de los controladores de presión (manómetros tipo bourdon) mediante un laboratorio de metrología en proceso de acreditación por la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación), lo que garantiza la trazabilidad metrológica a patrones de medición nacionales e internacionales.
- (ii) El capítulo anterior detalló ampliamente el cálculo de la desviación media cuadrática para cada polinomio evaluado. Este parámetro (incertidumbre de ajuste) fue fundamental para especificar el polinomio que mejor modela los datos experimentales. El método estadístico utilizado –método de los mínimos cuadrados ordinarios– permitió, entre otras funciones, encontrar los errores sistemáticos, correcciones e incertidumbre para cada uno de los puntos obtenidos de forma experimental. Para el caso de Manómetro Measureman, el polinomio que mejor ajustó los datos experimentales, correspondió a una curva de tercer grado y la incertidumbre de ajuste fue estimada en 0,0865 psi. En el segundo caso, el Manómetro Rockage fue asociado a un ajuste polinomial de cuarto grado, cuya incertidumbre fue estimada en 0,1766 psi. Estos resultados permitieron concluir que, no necesariamente, a medida que aumenta el grado del polinomio, la incertidumbre de ajuste también aumenta. Esto depende de la naturaleza del experimento y el

comportamiento físico de los datos experimentales. Describir y caracterizar tales comportamientos, fue la principal motivación para el desarrollo de la investigación.

(iii) La incertidumbre expandida asociada a la medición de los manómetros evaluados fue estimada para cada situación, dentro de un nivel de confianza de 95,0%. En general, las fuentes de incertidumbre consideradas fueron: resolución de instrumento, patrones de medición, ajuste por el método de los mínimos cuadrados. Los valores de incertidumbre estimada para cada caso fueron: Manómetro Measureman, 0,30 psi; Manómetro Rockage, 0,61 psi. La normatividad colombiana para la metrología de presión (NTC 1420:2001) define los errores máximos permitidos de manómetros tipo bourdon en función de la clase de exactitud del instrumento. Para el caso particular de la instrumentación evaluada en esta investigación, los errores corresponden a: Manómetro Measureman (Clase de exactitud 1,6%, Rango: 0 a 30 psi), 0,48 psi; Manómetro Rockage (Clase de exactitud 1,6%, Rango: 0 a 100 psi), 1,60 psi. Comparando los resultados obtenidos con aquellos establecidos por la NTC 1420:2001, se concluye que los instrumentos evaluados atienden los requisitos de la normatividad colombiana en cuanto a los errores máximos permitidos.

(iv) Los resultados de la aplicación del método de los mínimos cuadrados permitieron concluir que el desempeño metrológico de los Manómetros es estadísticamente igual para un rango de medida entre 0 y 30 psi, dentro de un nivel de confianza de 95,0%. Lo anterior indica que los manómetros pueden ser utilizados en procesos que contemplen el rango de medición evaluado. El desempeño metrológico de los mismos, en cuanto errores e incertidumbres, estará dentro de los límites permitidos. Cabe mencionar la importancia de considerar factores como el fluido de trabajo y las condiciones ambientales de operación, al momento de la escogencia de un determinado manómetro para controlar un proceso de medición.

Finalmente, como trabajos que pueden ser desarrollados a partir de la investigación aquí documentada, resultados consolidados y conclusiones formuladas, los investigadores recomiendan:

- realizar el experimento variando el número de datos experimentales con el propósito de verificar el número de puntos óptimo en el cual la incertidumbre de medición no tendría variaciones significativas;
- aplicar métodos estadísticos robustos (test de hipótesis paramétricos y no paramétricos) con el fin de determinar el tipo de distribución de probabilidad que caracteriza los datos de la calibración de un manómetro tipo bourdon.

Bibliografía

- [1] B Fox, R. W., McDonald, A. T., Cázares, G. N., & Callejas, R. L. (1995). Introducción a la Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill.
- [2] Almeida F., 2016. Curso de Técnicas Experimentais em Engenharia Automobilística. Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP - Brasil.
- [3] Mott, R. L. (1996). Mecánica de fluidos aplicada. Pearson Educación.
- [4] R. Figliola, D. Beasley., 2009. Mediciones mecánicas: teoría y diseño. 4ed. Editorial: Alfa e Omega. Mexico
- [5] A. Creus., 2007. Instrumentación Industrial. 6ed. Editorial: AlfaOmega marcombo. Barcelona, España.
- [6] Schneider, P., 2012. Curso medições termicas: Aula – Medição de pressão em fluidos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS - Brasil.
- [7] Tobias Roberto Mugge. FIERGS SENAI. Disponible en:
https://tobiasmugge.files.wordpress.com/2008/10/apostila_cm.pdf Fecha de acceso: 24 de abril de 2019
- [8] Medición & Control. Medellín, Colombia. Disponible en:
<https://www.medicionycontrol.com.co/medicion-de-flujo-la-variable-mas-medida-de-la-industria/> Fecha de acceso: 24 de abril de 2019
- [9] Ennaifer, A. M., & Kuchuk, F. J. (2018). Pressure transient measurement statistics and gauge metrology. Journal of Petroleum Science and Engineering, 166, 531-545
- [10] Wamsiedler, R., Wojke, R., Pieper, W., & Christmann-Braun, H. (1997). U.S. Patent No. 5,614,677. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [11] Wu, S. (2018). U.S. Patent Application No. 15/725,305
- [12] Kajikawa, H., & Kobata, T. (2019). Evaluation and correction for long-term drift of hydraulic pressure gauges monitoring stable and constant pressures. Measurement, 134, 33-39

- [13] Pedraza-Yepes, C., Hernández-Vásquez, J. D., Forero, F. P., Manotas, L. P., & González-Coneo, J. (2018). Metrological Evaluation of a Bourdon Manometer from the Ordinary Least Squares Method
- [14] Pérez, L., Pastor, F., Pedraza, C., Hernandez, J., & Ibañez, I. (2016). Confiabilidad metrológica de un manómetro tipo bourdon para aplicaciones en procesos de transferencia de calor. In Simposio CENAM
- [15] Sestan, D., Grgec-Bermanec, L., & Zvizdic, D. (2019). Improved method for pressure measurement in saturation chamber of primary dew/frost point generators. *Measurement*, 133, 162-167.
- [16] GUM, I. (2008). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (1995), with Supplement 1, Evaluation of measurement data, JCGM 101: 2008. Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.