

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN  
DE LOS MEDIDORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL LABORATORIO  
DE METROLOGÍA DE ICOBANDAS S.A.**



**NATALI WBELLY OROZCO CORREA  
ELMER ALONSO PIZO GURRUTE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2019**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN  
DE LOS MEDIDORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL LABORATORIO  
DE METROLOGÍA DE ICOBANDAS S.A.**

**NATALI WBELLY OROZCO CORREA  
ELMER ALONSO PIZO GURRUTE**

**Trabajo en modalidad de práctica profesional presentado como requisito  
para optar al título de Ingeniero Físico**

**Director  
Mg. Mario Milver Patiño**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2019**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del director**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Popayán, 1 de noviembre de 2019.**

## DEDICATORIA

### ***A Dios y a mi familia***

*Por estar siempre apoyándome de manera incondicional y darme ánimos para culminar esta etapa que apenas empieza.*

Natali Orozco

### ***A Dios y familia***

*Por su ayuda constante y darme la fuerza para continuar en las circunstancias más adversas.*

Elmer Pizo Gurrute

## **AGRADECIMIENTOS**

Al creador de todo el universo por siempre estar presente en mi vida, mostrándome el camino y enseñándome a luchar a pesar de las adversidades, por todas las buenas energías que me ha permitido atraer... Gracias primeramente a el Dios en el que creo. Así mismo, agradezco a mi padre terrenal y a mi madre, por brindarme sus consejos y ayudarme en mi formación como persona de valores y buenos sentimientos, dándome ánimo y apoyo durante este largo camino de la vida, también a mis hermanos por creer en mí y animarme cuando estuve a punto de desfallecer, igualmente doy gracias a mi esposo, mi hijo, mi suegra y mi cuñado porque siempre han estado ahí brindándome su apoyo incondicional y todo su amor. Agradezco también a mis compañeros por su amistad y todo su apoyo, por la oportunidad de conocerlos y llevarme lo más bonito de cada uno, más aún a la Universidad del Cauca por todas las herramientas que me brindo durante mi carrera profesional y a todos los magníficos profesores que ampliaron mis conocimientos y me enseñaron a soñar con llegar a ser una ingeniera Física. Finalmente agradezco a la empresa Icobandas S.A. por darme la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones y al personal de trabajo con el que tuve el honor de trabajar, brindándome su apoyo, sus ideas, sus valores, su confianza y la capacidad de trabajar en equipo en un ambiente laboral excepcional. ¡Mil gracias a todos!

***Natali Orozco***

A Dios por ayudarme a labrar un camino en mi vida y mostrarme la luz en los momentos más oscuros, gracias a las dos personas más especiales en mi vida, mi padre y madre por enseñarme a luchar por los sueños, los consejos, valores y enseñanzas siempre me impulsaron a seguir adelante a no desfallecer en este arduo camino de la vida, a mis hermanos por ayudarme cuando lo necesite, por enseñarme a creer y confiar. A mis tíos por su apoyo incondicional, por brindarme todo su amor. A toda una serie de personas que de una u otra forma contribuyeron a construir este logro de esta etapa de mi vida. A la Universidad del Cauca por abrirme las puertas al conocimiento, con ayuda de un excelente personal docente que imparten con dedicación y finalmente a Icobandas S.A. por permitir la realización del proyecto, por brindar la oportunidad de interactuar en su excelente ambiente laboral.

***Elmer Pizo Gurrute***

## CONTENIDO

|   | pág. |
|---|------|
| RESUMEN .....   | 12   |
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 13   |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                  | 14   |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 15   |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....  | 15   |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                     | 15   |
| 2. MARCO TEÓRICO .....  | 16   |
| 2.1 DEFINICIÓN DE METROLOGÍA .....                                    | 16   |
| 2.1.1 Metrología científica .....                                     | 16   |
| 2.1.2 Metrología Legal .....  | 16   |
| 2.1.3 Metrología Industrial .....                                     | 17   |
| 2.2 ANTECEDENTES DE LA METROLOGÍA .....                               | 17   |
| 2.2.1 A nivel internacional .....                                     | 17   |
| 2.2.2 En el contexto colombiano .....                                 | 18   |
| 2.3 TRAZABILIDAD METROLÓGICA .....                                    | 18   |
| 2.4 INTRODUCCIÓN A LA TERMOMETRÍA .....                               | 18   |
| 2.4.1 La temperatura Celsius .....                                    | 19   |
| 2.4.2 Ley “cero” de la termodinámica .....                            | 19   |
| 2.4.3 Sensor de resistencia de platino .....                          | 19   |
| 2.4.4 Modelo de Callendar Van Dusen .....                             | 20   |
| 2.4.5 Coeficiente de temperatura de la resistencia .....              | 21   |
| 2.4.6 Punto de fusión del hielo .....                                 | 21   |
| 2.4.7 Calibración de termómetros de resistencia de platino .....      | 22   |
| 2.5 MEDICIÓN DE PRESIÓN DE UN TRANSMISOR .....                        | 23   |
| 2.5.1 Clases de transmisores de presión .....                         | 23   |
| 2.5.2 Calibración de transmisor de presión con salida eléctrica ..... | 24   |
| 2.6 METODOS DE MEDICIÓN .....   | 25   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.6.1 | Métodos normalizados.....  | 25 |
| 2.6.2 | Métodos desarrollados por el laboratorio.....                    | 25 |
| 2.6.3 | Métodos no normalizados.....                                     | 25 |
| 2.6.4 | Método de medición directa.....                                  | 26 |
| 2.6.5 | Método de medición indirecta.....                                | 26 |
| 2.6.6 | Método de medición por nulo o cero.....                          | 26 |
| 2.7   | METODOS DE CALIBRACIÓN.....                                      | 26 |
| 2.7.1 | Calibración por comparación directa.....                         | 26 |
| 2.7.2 | Calibración por sustitución.....                                 | 26 |
| 2.7.3 | Calibración por equilibrio.....                                  | 26 |
| 2.7.4 | Calibración por transferencia.....                               | 27 |
| 2.7.5 | Calibración por puntos fijos.....                                | 27 |
| 2.8   | CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE.....                                 | 27 |
| 2.8.1 | Incertidumbre estándar.....                                      | 28 |
| 2.8.2 | Evaluación (de incertidumbre) Tipo A.....                        | 28 |
| 2.8.3 | Evaluación (de incertidumbre) Tipo B.....                        | 29 |
| 2.8.4 | Determinación de la función.....                                 | 30 |
| 2.8.5 | Incertidumbre estándar combinada.....                            | 33 |
| 2.8.6 | Incertidumbre expandida.....                                     | 33 |
| 2.8.7 | Factor de cobertura k.....                                       | 34 |
| 3.    | ESTADO INICIAL DEL LABORATORIO.....                              | 35 |
| 3.1   | INSTRUMENTACIÓN.....   | 35 |
| 3.1.1 | Temperatura.....   | 36 |
| 3.1.2 | Presión.....   | 37 |
| 3.2   | DOCUMENTACIÓN.....   | 38 |
| 4.    | EQUIPOS MEDIDORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN DE ICOBANDAS S.A.39   |    |
| 4.1   | Instrumentos para la medida de temperatura en Icobandas s.a..... | 39 |
| 4.1.1 | Termómetros Bimetálicos.....                                     | 39 |
| 4.1.2 | Termómetros de resistencia de platino Pt-100.....                | 40 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2   | Instrumentos para la medida de Presión en Icobandas s.a. ....     | 42 |
| 4.2.1 | Manómetro de tubo de Bourdon. ....                                | 43 |
| 4.2.2 | Transductor de presión. ....                                      | 43 |
| 4.2.3 | Transmisor de presión. ....                                       | 44 |
| 5.    | PROCEDIMIENTOS DE COMPROBACIÓN. ....                              | 45 |
| 5.1   | PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DEL TERMOMETRO Pt-100. ....         | 45 |
| 5.2   | PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN. ....     | 48 |
| 6.    | SOFTWARE DE COMPROBACIÓN. ....                                    | 52 |
| 6.1   | MODELO DE MEDICIÓN PARA TERMOMETROS DE RESISTENCIA Pt-100         | 52 |
| 6.1.1 | Cálculo del valor de temperatura a partir de su resistencia. .... | 54 |
| 6.2   | MODELO DE MEDICIÓN PARA TRANSMISOR DE PRESIÓN. ....               | 55 |
| 6.3   | VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE. ....                                   | 56 |
|       | CONCLUSIONES .....  | 59 |
|       | RECOMENDACIONES .....   | 60 |
|       | BIBLIOGRAFÍA .....  | 61 |
|       | ANEXOS.....   | 64 |



## LISTA DE TABLAS

|  | pág. |
|--|------|
| <i>Tabla 1.</i> Clases de tolerancia según IEC 60751.....  | 22   |
| <i>Tabla 2.</i> Fuentes de variación en la comprobación de los equipos.....                        | 31   |
| <i>Tabla 3.</i> Principales características del baño térmico.....                                  | 36   |
| <i>Tabla 4.</i> Principales características del manómetro Patrón.....                              | 37   |
| <i>Tabla 5.</i> Parámetros de la incertidumbre para la comprobación de las pt-100. ....            | 47   |
| <i>Tabla 6.</i> Parámetros de la incertidumbre para la comprobación del transmisor de presión..... | 50   |
| <i>Tabla 7.</i> Conjunto de coeficientes estándar para la Pt-100 según la norma EN 60751.....      | 54   |
| <i>Tabla 8.</i> Prueba de comprobación de Pt-100.....  | 57   |
| <i>Tabla 9.</i> Prueba de la comprobación de Transmisor de presión.....                            | 58   |

## LISTA DE FIGURAS

|  | pág. |
|--|------|
| Figura 1 Distribución Normal.....  | 29   |
| Figura 2. Distribución rectangular.....  | 30   |
| Figura 3. Baño térmico.....  | 36   |
| Figura 4. Banco comparador de presiones con el manómetro Patrón. ....                          | 37   |
| Figura 5. Termómetro Bimetálico .....  | 40   |
| Figura 6. Estructura interna de un termómetro de resistencia de Platino Pt-100. 40             |      |
| Figura 7. Resistencia Vs Temperatura para una Pt-100.....                                      | 41   |
| Figura 8. Termopar tipo J.....   | 42   |
| Figura 9. Tubo Bourdon.....  | 43   |
| Figura 10. Funcionamiento de un transductor de fuerza a base de galgas<br>extensométricas..... | 43   |
| Figura 11. Funcionamiento de un transmisor de presión.....                                     | 44   |
| Figura 12. Montaje para la comprobación de las Pt-100. ....                                    | 46   |
| Figura 13. Montaje para la comprobación de los transmisores de presión. ....                   | 49   |
| Figura 14. Diagrama de comprobación de equipos.....  | 57   |
| Figura 15. Error Vs. Temperatura para la prueba de comprobación de una Pt-100.<br>.....        | 57   |
| Figura 16. Error Vs. Presión para la prueba de comprobación del Transmisor de<br>presión.....  | 58   |

## LISTA DE ANEXOS

|  | pág. |
|--|------|
| <i>ANEXO A.</i> Procedimiento de comprobación para la Pt-100 .....               | 64   |
| <i>ANEXO B.</i> Procedimiento de comprobación para el transmisor de presión..... | 72   |
| <i>ANEXO C.</i> Protocolo de comprobación para termómetros Pt-100.....           | 80   |
| <i>ANEXO D.</i> Protocolo de comprobación para transmisor de presión.....        | 81   |
| <i>ANEXO E.</i> Carta de aval de la empresa Icobandas S.A.....                   | 82   |

## RESUMEN

Este proyecto plantea el diseño e implementación de un método de comprobación para corroborar y garantizar el adecuado funcionamiento del transmisor de presión /Huba Control/ y los sensores de temperatura /PT100/, utilizados en el laboratorio de metrología de la empresa Icobandas s.a. En primer lugar, se realizó el procedimiento con sus respectivos cálculos de incertidumbre, mientras que se seleccionaban los patrones adecuados para esta tarea, posteriormente, se automatizó este proceso mediante un software que permite al operario (metrologo), registrar los datos necesarios con el fin de obtener los resultados de incertidumbre de manera rápida y de acuerdo a los procedimientos establecidos para cada instrumento de medición, el programa permite saber si el equipo se encuentra en óptimas condiciones de medida y pasa la prueba.

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa Icobandas s.a. se dedica a la producción y comercialización de bandas de caucho, de transmisión y transportadoras, cuenta con políticas de calidad y servicio como estrategia empresarial, donde las características de las materias primas, los controles estrictos sobre estas, los laboratorios y los procesos de producción la han llevado a alcanzar niveles de excelencia en el mercado. La empresa realiza un esfuerzo importante por mantener altos estándares de calidad en sus productos, por eso, evalúa constantemente sus procesos para identificar algunos aspectos que deben ser mejorados y poder tomar acciones inmediatas que sean rentables y garanticen los altos estándares de calidad de sus productos y del servicio al cliente.

Como empresa competitiva a nivel nacional e internacional, cuenta con la certificación ISO 9001 que respalda la alta calidad de sus productos y que como norma requiere un control continuo de los dispositivos de seguimiento y medición. Es así como la empresa cuenta con un laboratorio de Metrología que se encarga de realizar las comprobaciones internas a los equipos críticos, siguiendo la documentación existente en dicho laboratorio. Debido a las diferentes auditorías realizadas y a las no conformidades en el área de Metrología, se llegó a la necesidad de implementar la comprobación de los termómetros de resistencia Pt-100 en el laboratorio de Metrología; inicialmente las pruebas para los termómetros se hacían en laboratorios externos, al mismo tiempo que generaba más costos para la empresa, del mismo modo, el transmisor de presión no había sido comprobado y en vista de ello, fue necesario realizar por primera vez la comprobación de este instrumento en el laboratorio de Metrología de Icobandas s.a.

Ya que los procedimientos de comprobación requieren de diferentes exigencias para cada instrumento, se realizó un estudio detallado a cada proceso, acondicionando las recomendaciones de las normas a los requerimientos de la empresa para las Pt-100 y el transmisor de presión; por otro lado, se desarrolló un software que permite la recepción de datos por parte del metrologo para cada instrumento y muestra los resultados de acuerdo a los procedimientos establecidos para cada instrumento de medición de variables críticas.

Para la realización de los procedimientos se tuvo en cuenta algunos factores como la clasificación de los equipos de trabajo, la elección de los patrones adecuados, las condiciones ambientales necesarias, el cálculo de error, tolerancia e incertidumbre del equipo a calibrar, entre otras.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Toda fábrica requiere de mediciones elementales y a medida que un proceso de producción se hace más complejo, es importante que sus mediciones sean lo más acertadas posibles y cumplan con las políticas de calidad. La empresa Icobandas s.a. no es la excepción y debe continuamente realizar adecuadas mediciones para el control en su proceso de fabricación, diseño y desarrollo de sus productos, más aún para el control de calidad del producto terminado en conformidad con la certificación ISO 9001, la cual respalda la competitividad y alta calidad de sus productos, así como cumplir con los requerimientos del cliente.

Como requisito de la norma ISO 9001 se debe realizar un control de los dispositivos de seguimiento y medición, por lo que la empresa evalúa constantemente sus procesos con el fin de poder identificar los aspectos a mejorar y tomar acciones inmediatas y rentables. De esta forma, se estableció que los instrumentos utilizados para realizar las medidas de presión y temperatura con que cuenta la empresa requieren de un proceso periódico de verificación que le permita asegurar una medida confiable, pero dichos procedimientos no estaban estandarizados para los termómetros de tipo Pt-100 y para el transmisor de presión.

A partir de lo anterior, en este trabajo de grado se plantea si ¿Es viable diseñar e implementar un procedimiento de comprobación de los medidores de temperatura y presión de la empresa Icobandas s.a.?, con el fin de ayudar a reducir costos y optimizar los recursos de la empresa, en vista de que los termómetros Pt-100 y el transmisor de presión no cuentan con los patrones, ni el método necesario para ser comprobados en el laboratorio de Metrología de Icobandas s.a. y, por consiguiente, deben enviarse a laboratorios externos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un procedimiento de comprobación de los equipos medidores de presión y temperatura en el laboratorio de Metrología de Icobandas s.a.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar los patrones adecuados para la medición de presión y temperatura según los requerimientos de laboratorio de Metrología de la empresa Icobandas s.a.
- Diseñar e implementar los procedimientos requeridos para verificar el correcto funcionamiento de los medidores de presión y temperatura utilizados en la empresa Icobandas s.a. de acuerdo con la normativa existente.
- Diseñar e implementar una herramienta software para automatizar el proceso de comprobación de los medidores de presión y temperatura, de acuerdo con los requisitos, la normativa y los procedimientos internos de la empresa.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 DEFINICIÓN DE METROLOGÍA**

La metrología es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades y los métodos y técnicas de medición, con el fin de mejorar la calidad en las mediciones y facilitar el desarrollo científico y tecnológico, así como el bienestar social y la calidad de vida [1]. La metrología es una ciencia en constante evolución y muchos de los procesos tecnológicos se dan por el avance de ella, además puede clasificarse en tres clases, según el campo de aplicación que son:

#### **2.1.1 Metrología científica.**

Se ocupa de la organización y la mejora de los patrones de medida, las técnicas y métodos de medición, los instrumentos y la exactitud de las medidas [2], Se ocupa, entre otras, de actividades como:

- Mantenimiento de patrones Internacionales.
- Búsqueda de nuevos patrones que representen o materialicen de mejor manera las unidades de medición.
- Mejoramiento de la exactitud de las mediciones necesarias para los desarrollos científicos y tecnológicos.

#### **2.1.2 Metrología Legal.**

Está relacionada con las actividades que se derivan de los requisitos legales que se aplican a la medición, las unidades de medida, los instrumentos de medida y los métodos de medida que se llevan a cabo por los organismos competentes [3]. Su objetivo es proteger a los consumidores para que reciban los bienes y servicios con las características que ofrecen los diferentes fabricantes. Debe ejercerla el gobierno y entre sus campos de acción están:

- Verificación de pesas, balanzas y básculas.
- Verificación de cintas métricas.
- Verificación de surtidores de combustible.
- Verificación de productos pre empacados.
- Control de escapes de gas de automóviles.
- Taxímetros.
- Contadores eléctricos de agua y de gas, etc.



### **2.1.3 Metrología Industrial.**

Asegura el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición empleados en la industria y en los procesos de producción y verificación. Tiene como objetivo principal controlar, asegurar y mejorar la calidad y la confiabilidad de los distintos productos obtenidos en procesos industriales [4].

Este ámbito de la metrología, será el de mayor aplicación en el presente proyecto, dado que el objetivo principal es desarrollar e implementar los procedimientos de comprobación para las Pt-100 y el transmisor de presión, llevadas a cabo en un laboratorio industrial.

## **2.2 ANTECEDENTES DE LA METROLOGÍA.**

### **2.2.1 A nivel internacional [5].**

La confiabilidad de las mediciones que se realizan en todos los campos del quehacer humano para llevar a cabo procesos de fabricación o investigación son necesarias a nivel mundial para garantizar la eficiencia de un proceso productivo, en la calidad de los productos y en la conformidad que estos requieren con las diferentes normativas nacionales e internacionales.

La Metrología en su interés por la determinación de la medida del globo terrestre y los trabajos correspondientes puso de manifiesto la necesidad de un sistema de pesas y medidas universal, que culminó con la creación del Buró Internacional de Pesas y Medidas y la construcción de patrones para el metro y el kilogramo en 1872. El buró tiene como objetivo "asegurar en todo el mundo la uniformidad de las mediciones y su trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades", luego, el 20 de mayo de 1875 se firmó la Convención del Metro que creó una organización que ha permitido la cooperación e intercambio entre los diferentes países, La convención creó tres organizaciones principales: La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), El Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM).

Ahora bien, el BIPM como coordinador del sistema de medición mundial tiene como misión el trabajar con los institutos Nacionales de Metrología (INM) de los Estados miembros y los socios estratégicos en todo el mundo para promover la comparabilidad global de las mediciones y obtener un equilibrio mundial entre las capacidades de metrología de los países miembros, basándose en la creación de capacidad y en la transferencia de conocimiento mediante diferentes publicaciones metrológicas, tanto por la IBPM como por los diferentes INM del mundo.

### **2.2.2 En el contexto colombiano [6].**

En Colombia, la superintendencia de Industria y Comercio (SIC) actúa como Organismo Nacional de Metrología con funciones de metrología científica e industrial y como organización nacional de metrología legal. La SIC no es la única entidad que realiza actividades de metrología y que ofrece servicios de trazabilidad a otros laboratorios. Mediante el Decreto 4175 de 2011 se escindieron las funciones relacionadas con la Metrología Científica e Industrial de la Superintendencia de Industria y Comercio y se creó el Instituto Nacional de Metrología (INM) como Unidad Administrativa Especial de carácter técnico, científico y de investigación. El INVIMA, el ICA, el Instituto Nacional de Salud y el IDEAM, también cumplen funciones de metrología.

Las leyes y decretos que rigen la metrología en Colombia fueron impulsadas por la globalización y el entendimiento que el progreso del país sería ayudado por la normalización de las medidas para entrar en el comercio internacional.

### **2.3 TRAZABILIDAD METROLÓGICA [7].**

Es la propiedad de un estado de medida, por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida. La documentación que garantiza la trazabilidad metrológica son los certificados de calibración, generados por los laboratorios acreditados competentes.

### **2.4 INTRODUCCIÓN A LA TERMOMETRÍA.**

La magnitud física que se emplea para medir en términos físicos las sensaciones de caliente y frío se denomina temperatura. En un sentido teórico estricto, se han propuesto diversas interpretaciones para la temperatura.

Desde un punto de vista microscópico, la temperatura se considera una representación de la energía cinética interna media de las moléculas que integran el cuerpo considerado. Esta energía cinética se manifiesta en forma de agitación térmica, que resulta de la colisión entre las moléculas del cuerpo y puede llegar a ser muy energética.

En el plano macroscópico, el incremento de la temperatura produce diversos efectos perceptibles o mensurables, como un aumento del volumen del cuerpo, la disminución de la densidad, el cambio de estado o la modificación del color (por ejemplo, enrojecimiento) [8].

Desde un punto de vista termodinámico, sería “aquello que tienen en común los sistemas que están en equilibrio térmico” o “cantidad inventada para parametrizar el equilibrio térmico”. La mecánica estadística formaliza la definición anterior al decir que es “Una medida de la agitación térmica en un sistema.

#### **2.4.1 La temperatura Celsius [9].**

La escala centígrada fue creada por Anders Celsius (1701-1744), quien inicialmente usó la escala invertida: tomó 100 como el punto de congelación del agua y 0 como el punto de ebullición del agua, de aquí el nombre de cien (100) unidades ó divisiones ó grados entre ambos puntos. Posteriormente, se adoptó la forma actual: 0 para el punto de hielo y 100 para el punto de ebullición del agua.

La escala centígrada fue reemplazada por la Celsius en 1948, como honor a Celsius. De los tres nombres: “grado centígrado”, “grado centesimal” y “grado Celsius” propuestos para denotar el grado de temperatura el Comité Internacional de Pesas y Medidas, CIPM eligió “grado Celsius”. También, la IX Conferencia General de Pesas y Medidas, CGPM adoptó este nombre.

En la escala termodinámica la temperatura del punto del hielo es 273,15 K. Una temperatura termodinámica expresada en esta forma es conocida como temperatura Celsius, símbolo t, definida por:

$$t(^{\circ}C) = T(K) - 273,15K \quad (1)$$

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo °C, y su intensidad calórica equivale a la del Kelvin.

De la ecuación anterior se puede deducir que los valores en el punto triple del agua (donde coexisten gas, agua y hielo) son respectivamente 273,16 K y 0,01 °C.

#### **2.4.2 Ley “cero” de la termodinámica [10].**

Si dos sistemas están por separado, en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre ellos. Esta ley es la base para dar sentido a la medida de la temperatura puesto que si el tercer sistema se considera un termómetro, entonces calibrándolo frente al primer sistema, transfiere el valor de temperatura al segundo.

#### **2.4.3 Sensor de resistencia de platino.**

Históricamente se ha dado el crédito a Wemer Von Siemens de haber fabricado el primer termómetro industrial. Propuso su construcción en su Cátedra Baberian

de 1871, y sugirió un algoritmo para la interpolación que constaba de tres términos. Se volvió muy popular en muy poco tiempo, debido, primordialmente, a la fama de su inventor, e igualmente cayó rápido en desuso debido a problemas de estabilidad [11].

En 1885, Callendar desarrolló el primer RTD (del inglés: *resistance temperature detector*) de platino comercialmente satisfactorio. Callendar descubrió que el aislante utilizado por Siemens era quebradizo causando tensiones internas lo que producía la inestabilidad de las indicaciones. Cambió el material aislante y recoció el RTD a temperaturas más altas.

En 1887, Callendar publicó un artículo titulado “*On the practical measurement of temperature*” el cual puede ser considerado como el inicio de la termometría de resistencia, desde entonces, los termómetros de resistencia de platino han sido establecidos para la determinación (interpolación) de temperaturas entre los puntos fijos definidos en las escalas de temperatura internacionalmente reconocidas. En este trabajo propuso la ecuación de resistencia dependiente de la temperatura para resistores de platino [12].

Cuando se comparó la ecuación de Callendar para resistores de platino con termometría de gas a bajas temperaturas, se encontró que era inexacta.

En 1925, Van Dusen un investigador del *National Bureau of Standards* (NBS) ahora NIST, amplió la ecuación a  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , propuesta que permitió compensar estas inexactitudes.

#### 2.4.4 Modelo de Callendar Van Dusen [13].

El modelo de Callendar Van Dusen que describe el comportamiento de la resistencia eléctrica de un sensor de platino con la temperatura está definida por:

$$R_T = R_0[AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad (2)$$

Con  $C = 0$  para  $T \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ó  $C \neq 0$  para  $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

La calibración de un termómetro de resistencia de platino según el modelo de Callendar Van Dusen consiste en expresar el conjunto de coeficientes  $R_0$ ,  $A$ ,  $B$  y  $C$  propios o característicos de ese termómetro particular, usando el método de comparación. Así, para el caso de  $t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  el cálculo de coeficientes se reduce a tres coeficientes:  $R_0$ ,  $A$  y  $B$ . Donde  $R_0$  es, por definición, la resistencia que presenta una termorresistencia de platino a la temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (punto de fusión del hielo).

Primero, se calculan los coeficientes de Callendar Van Dusen para el caso de  $t \geq 0$  °C. Una vez calculados  $R_0$ , A y B se evalúa el coeficiente C usando una medición  $t < 0$  °C.

Para la otra forma de la ecuación de Callendar Van Dusen:

$$R_T = R_0 + \alpha R_0 \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right)^3 \right] \quad (3)$$

Se establecieron una serie de relaciones entre el valor de  $\alpha$  y las constantes  $\delta$  y  $\beta$  a partir de los valores de A, B y C que son los que actualmente figuran en la norma IEC 60751.

#### 2.4.5 Coeficiente de temperatura de la resistencia.

Cada uno de los diferentes metales utilizados como elemento sensor tiene una cantidad diferente de cambio relativo en resistencia por unidad de cambio en temperatura. Una medida de la sensibilidad del termómetro de resistencia es su coeficiente de temperatura  $\alpha$ .

El coeficiente  $\alpha$ , define la pureza del sensor y determina la sensibilidad de un termómetro de resistencia y se define como:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (4)$$

donde,

$R_{100}$  = Resistencia de un termómetro de platino a la temperatura de 100°C

Entre mayor sea el coeficiente de temperatura, mayor el cambio en resistencia para un cambio de temperatura dado.

Determinando o conociendo los coeficientes A y B se puede determinar también el valor de alfa, mediante la ecuación 5:

$$\alpha = A + 100B \quad (5)$$

#### 2.4.6 Punto de fusión del hielo [14].

La temperatura más usada para la calibración es 0°C. El punto de fusión de hielo es un sistema físico, que se define como la temperatura de equilibrio entre hielo y

Aire-Agua saturada a presión atmosférica normal. El hielo debe estar finamente picado e inundado con agua suficiente para rellenar los huecos que queden entre las partículas, así evitar burbujas de aire y poder obtener una incertidumbre de la reproducción de este punto entre  $\pm 2\text{mK}$  y  $\pm 5\text{mK}$ .

#### **2.4.7 Calibración de termómetros de resistencia de platino [4].**

El tipo de calibración se determina de acuerdo a la forma en que el usuario va a utilizarlo y de la exactitud requerida. Para la calibración por comparación de un RTD puede llevarse a cabo en 2 subcategorías, que según la EIT-90 son: Clasificación y caracterización.

##### **2.4.7.1 Clasificación de una RTD.**

Conocida como prueba de tolerancia, se utiliza para calibrar RTDs, cuya aplicación requiera poca exactitud. El método se basa en comparar el termómetro de resistencia respecto a los valores del estándar, según la norma IEC 60751, a varios puntos de temperatura.

Con este método se establece una clase para el equipo calibrado. Las clases de tolerancia definen el máximo error de linealidad que posee una RTD respecto al estándar. Al comparar diferentes puntos de temperatura, es posible que las clases resultantes de la calibración en cada uno de los puntos de temperatura no coincidan. Si es así, siempre se toma la clase menos restrictiva de entre todos los puntos en que se ha realizado la calibración.

*Tabla 1.* Clases de tolerancia según IEC 60751

| <b>Clase</b> | <b>Tolerancia (IEC 60751)</b>                    |
|--------------|--|
| Clase 1/3 B  | $\pm [0,10 + (0,00167 \cdot  T )]^\circ\text{C}$ |
| Clase A      | $\pm [0,15 + (0,002 \cdot  T )]^\circ\text{C}$   |
| Clase B      | $\pm [0,30 + (0,005 \cdot  T )]^\circ\text{C}$   |

##### **2.4.7.2 Calibración de sensor por caracterización.**

Es el método utilizado para la calibración de una PRTI (Termorresistencia de Platino de uso Industrial) cuya aplicación requiere una exactitud media/alta. Se basa en determinar la resistencia de la PRTI a varios puntos de temperatura, ajustando los datos obtenidos a la expresión matemática del modelo estandarizado mediante el método de Callendar Van Dusen (según la norma IEC 60751). Los puntos de calibración deben ser escogidos de acuerdo al rango habitual de trabajo del equipo calibrado.

Con este método, se determina una nueva relación de resistencia versus temperatura en cada calibración, es decir, una nueva tabla cada vez que se realiza y se calculan nuevos coeficientes, los cuales se obtienen midiendo los valores de resistencia a un número de temperaturas conocidas utilizando métodos de análisis de regresión. En este caso el error de interpolación es reducido aproximadamente a la exactitud de la calibración.

## **2.5 MEDICIÓN DE PRESIÓN DE UN TRANSMISOR.**

La presión es una propiedad muy útil para describir el estado de un sistema, ya que muchos de los sistemas estudiados en termodinámica comprenden gases o vapores.

La presión es la fuerza por unidad de área aplicada sobre un cuerpo en la dirección perpendicular a su superficie. La fuerza se mide en newton y la superficie en metros cuadrados; la unidad de presión resultante se llama pascal.

En la termodinámica clásica no se consideran los efectos que pueden presentarse a escala microscópica; por lo tanto solo se tratará de presiones que existen sobre áreas grandes respecto a los espacios intermoleculares [15].

### **2.5.1 Clases de transmisores de presión [16].**

El transmisor es un elemento que capta una variable (presión) y la convierte en una señal capaz de ser transmitida. Actualmente, existen varios tipos de señales de transmisión como: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas, dentro de las cuales, las tres primeras son las más utilizadas en la industria.

#### **2.5.1.1 Transmisores neumáticos.**

Un transmisor neumático es un dispositivo mecánico que convierte un desplazamiento mecánico en variaciones proporcionales de presión.

Estos transmisores se basan en un sistema tobera-obturador, que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática variable linealmente de 3-15 psi para el campo de medida de 0-100% En los países que utilizan el sistema métrico decimal se emplea además la señal 0,2 – 1 bar.

#### **2.5.1.2 Transmisores electrónicos.**

Generalmente son más precisos y de respuesta más rápida que los mecánicos. Esto se debe en parte a la precisión de los circuitos electrónicos y en parte a los

pequeñísimos movimientos que se necesitan en los elementos elásticos para obtener el cambio eléctrico.

Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA C.C. a distancias de 200 m a 1 km, según sea el tipo de instrumento transmisor. Todavía pueden encontrarse transmisores que envían las señales 1-5 mA c.c., 10-50 mA c.c., 0,5 mA c.c., 1-5 mA c.c., 0-20 mA c.c., 1-5 V c.c., utilizadas anteriormente a la normalización a la señal indicada de 4-20 mA c.c.

Al transmisor que se requiere realizar la comprobación se tiene en cuenta la señal eléctrica que va de 4mA a 20 mA c.c. que al ser continua disminuye la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parasitas y emplea solo dos hilos.

### **2.5.1.3 Transmisores digitales.**

El primer transmisor digital denominado inteligente, fue presentado por la firma Honeywell (smart transmitter). Este concepto significa que el equipo tiene incorporadas funciones adicionales que se suman a las propias de la medida y transmisión exclusiva de la variable. Naturalmente estas funciones son elaboradas por un microprocesador, sin embargo, lo anterior no atribuye que el instrumento se designe inteligente. Existen dos modelos básicos de transmisores inteligentes sensor capacitivo y el semiconductor.

## **2.5.2 Calibración de transmisor de presión con salida eléctrica.**

### **2.5.2.1 Método por comparación [17].**

Este método consiste en un conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación entre el valor de una magnitud indicada por el instrumento de medida y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones. Para calibrar hace falta además un multímetro que mida la salida del instrumento a calibrar (Transmisor de Presión).

En general, para transmisores y transductores la relación entre la presión medida  $P$  y la señal eléctrica  $I$  está dada por la ecuación (6), donde los sensores del transmisor consiguen transformar las variaciones de presión en variaciones de voltaje o intensidad.

$$P = \frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot (I - l_E) \quad (6)$$

Donde,

$r_{TP}$ : Rango de medida del instrumento en unidades de presión.



$L_E$ : Mayor valor del rango eléctrico.

$l_E$ : Menor valor del rango eléctrico.

## **2.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN [18].**

Un método de medición es una sucesión lógica de las operaciones, descritas de una forma genérica, utilizadas en la ejecución de las mediciones.

En la metrología se cuenta con diferentes métodos de medición, determinados por los procedimientos existentes en el sistema de gestión. Para que cada método sea válido, se han basado en principios de medición o fundamentos científicos que los respalden de manera teórica y experimental.

La norma ISO/IEC 17025 [19] clasifica los métodos en términos de su origen como:

- Métodos normalizados.
- Métodos internos, desarrollados por el laboratorio.
- Métodos no normalizados.

### **2.6.1 Métodos normalizados.**

Los métodos de medición, prueba o calibración normalizados, son aquellos que se encuentran documentados en: normas internacionales, regionales o nacionales; organizaciones técnicas reconocidas; revistas, textos o guías científicas relevantes y de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

### **2.6.2 Métodos desarrollados por el laboratorio.**

Son los métodos desarrollados internamente por el laboratorio, cuando no se cuenta con métodos normalizados que cubran los servicios de medición, prueba o calibración requeridos.

### **2.6.3 Métodos no normalizados.**

Es el caso, cuando es necesario utilizar métodos no cubiertos por los métodos normalizados, los cuales son sujetos a acuerdo con el usuario.

Así mismo, complementando los métodos de medición calificados por el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) se tiene los más comunes, utilizados en metrología técnica e industrial:

#### **2.6.4 Método de medición directa.**

En este método se obtiene un valor en unidades del mensurando, mediante un instrumento o sistema de medición, digital o analógico, en forma de: indicador, registrador, totalizador o integrador. El sensor del instrumento es colocado directamente en contacto con el fenómeno que se mide.

#### **2.6.5 Método de medición indirecta.**

En este método se obtiene el valor del mensurando mediante: transformación, conversión o cálculo de Indicaciones, señales de medición, magnitudes de influencia o mediciones de las variables de entrada (independientes).

#### **2.6.6 Método de medición por nulo o cero.**

Este método utiliza un detector de nulos o equilibrio (comparador), el cual permite comprobar la igualdad (diferencia cero) entre el mensurando y un valor de referencia (patrón).

### **2.7 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.**

En estos métodos existe una relación entre el equipo de medida al cual se le va a realizar la calibración y el patrón de medida, tomando estos valores y relacionándolos entre sí como error, corrección o linealidad, con su respectiva incertidumbre. Ahora bien, la indicación de la medida que da el instrumento y/o el patrón puede ser mediante mediciones directas o indirectas, así como realizar o reproducir un valor. Pues bien, se puede decir que los métodos de calibración se derivan de los métodos de medición y los más usados a nivel industrial son:

#### **2.7.1 Calibración por comparación directa.**

Se comprara directamente los valores que proporciona el equipo de medida bajo calibración, contra los valores proporcionados por un patrón.

#### **2.7.2 Calibración por sustitución.**

Se utiliza un equipo auxiliar (comparador) con el que se mide el patrón y luego el equipo de medición sujeto a calibración.

#### **2.7.3 Calibración por equilibrio.**

Este método utiliza un detector de nulos, que permite comprobar la igualdad entre el patrón y el equipo sometido a la calibración.

#### **2.7.4 Calibración por transferencia.**

En este método se comparan los valores proporcionados por el equipo bajo prueba, contra los valores proporcionados por un patrón (valor de referencia), a través de un patrón de transferencia, incluso en diferente tiempo y lugar.

#### **2.7.5 Calibración por puntos fijos.**

En este caso el patrón utilizado en la calibración realiza un constante fundamental o derivada mediante la reproducción de fenómenos físicos o químicos.

Ejemplos:

- a) Puntos fijos de sales saturados para humedad relativa.
- b) Puntos fijos (triple, solidificación, fusión) de la ITS-90 para temperatura.
- c) Puntos fijos secundarios (fusión hielo).
- d) Puntos fijos de presión.

### **2.8 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE [20].**

La palabra “incertidumbre” significa duda, sobre la validez del resultado de una medida y refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando. El resultado de tomar una medida, después de aplicar las correcciones debidas a efectos sistemáticos, sigue siendo una estimación debido a la incertidumbre que proporciona los efectos aleatorios y a la falta de conocimiento completo de las correcciones aplicadas por los efectos sistemáticos.

Sin embargo, es necesario que exista un procedimiento fácil de usar y aceptado de manera general para caracterizar la calidad del resultado de una medición, y así evaluar y expresar su incertidumbre.

El método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre del resultado de una medición debe ser universal, es decir, que el método debe ser aplicable a cualquier tipo de mediciones y a cualquier tipo de datos utilizados en las mediciones.

La incertidumbre en el resultado de una medición consta, generalmente, de varias componentes que pueden ser agrupadas en dos categorías, dependiendo de la manera en que se estime su valor numérico:

- A) aquellas que se evalúan por métodos estadísticos.
- B) aquellas que se evalúan por otros medios.

A continuación se hará una breve descripción de los términos necesarios para la determinación de incertidumbres [21].

### 2.8.1 Incertidumbre estándar.

Margen cuyo tamaño se puede considerar como una desviación estándar, informa sobre la incertidumbre de un promedio, no solo de la dispersión de los valores. Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar.

### 2.8.2 Evaluación (de incertidumbre) Tipo A.

La evaluación tipo A de la incertidumbre se utiliza cuando se realizan  $n$  observaciones independientes entre sí de una de las magnitudes de entrada  $X_i$  bajo las mismas condiciones de medida.

Dicho de otro modo, la desviación estándar experimental del promedio es la estadística utilizada para la cuantificación de la incertidumbre estándar o teórica de tipo A de la medición:

$$u = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$x_i$ : Valor medido.

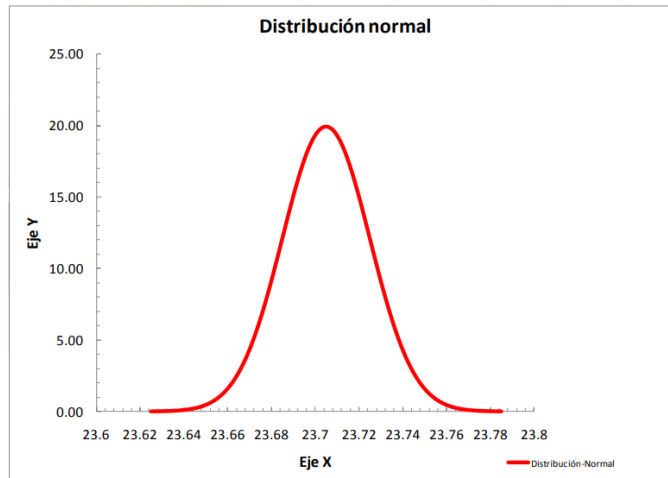
$\bar{x}$ : Valor promedio.

$n$ : Número de datos.

$u$ : Incertidumbre estándar.

#### 2.8.2.1 Distribución normal.

Para la fuente de incertidumbre por repetibilidad de las mediciones, si se grafica los datos obtenidos infinitamente en una medición es muy probable que la mayor parte de los datos los encontremos en una zona concentrada y que los restantes cada vez se vayan dispersando (o sean más escasos) más y más en los extremos, es decir, que existe mayor probabilidad de que el valor buscado (mensurando) se localice en la zona donde se repite más veces ese valor. A este tipo de comportamiento probabilístico se le denomina “distribución estándar o normal” y tiene forma de una campana. Una de sus características principales es que es asintótica en la base, es decir, “sus colas” tocan el cero hasta el infinito (figura 1).



Fuente: Metrología y Calidad MetryCal, Estimación de la Incertidumbre de Medida.

Figura 1 Distribución Normal.

Este tipo de distribución comúnmente se asigna a los valores que se reportan en los certificados de calibración de los patrones de referencia, ya que generalmente también provienen de una serie de repeticiones que realizó el laboratorio que calibró el instrumento.

### 2.8.3 Evaluación (de incertidumbre) Tipo B.

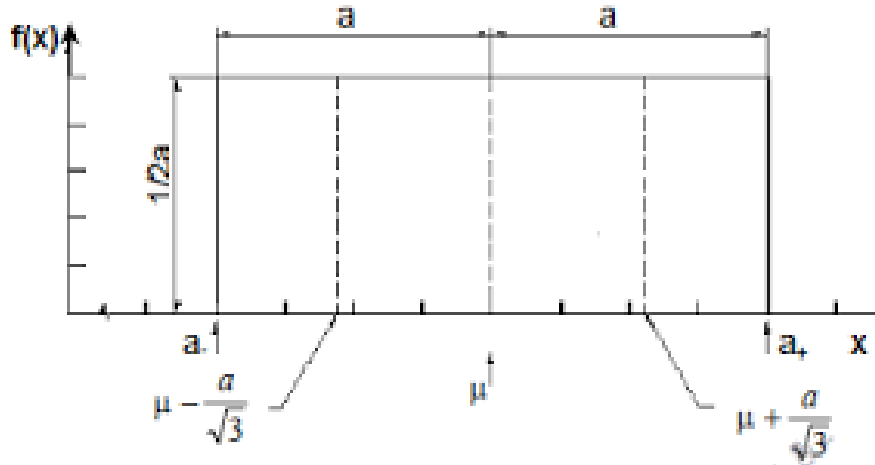
Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones.

La incertidumbre tipo B ocurre cuando se tiene una estimación  $x_i$  de una cantidad  $X_i$  que no se ha obtenido de mediciones repetitivas, entonces la varianza estimada  $u^2(x_i)$  o la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  se evalúan por un método científico basado en la información disponible acerca de la variabilidad de  $X_i$ , tal como resultado de mediciones anteriores, experiencia o conocimiento general acerca del comportamiento y propiedades de los materiales y los instrumentos utilizados, especificaciones del fabricante, datos suministrados por certificados de calibración u otros certificados e incertidumbres asignadas a datos de referencia tomados de manuales.

#### 2.8.3.1 Distribución rectangular.

Se utiliza cuando, por ejemplo, se dan límites ( $\pm a$ ) sin especificar el nivel de confianza y es esperable que todos los valores sean igualmente probables.

Para una distribución rectangular cada valor de  $x$  dentro del intervalo  $[-a, +a]$  tiene la misma probabilidad, o sea la densidad de probabilidad es constante (e igual a  $1/a$  dentro del intervalo). Donde  $a = a_- - a_+$ .



Fuente: Referente de laboratorio. (2015). Estimación de la Incertidumbre métodos de ensayo.

Figura 2. Distribución rectangular.

La desviación estándar (incertidumbre) finalmente resulta:

$$u(x) = \frac{a_- - a_+}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

#### 2.8.4 Determinación de la función.

Para determinar el error del instrumento de medida se define la función de error así:

$$E = \bar{X} - P \quad (8)$$

donde:

$\bar{X}$  = Promedio de las  $n$  indicaciones del instrumento.

$P$ : Valor del patrón.

Como el promedio de las  $n$  indicaciones del instrumento y el valor del patrón cuentan con errores inevitables que se dan por diferentes factores, es necesario introducir un término  $\Delta E$  que ayudara a obtener un valor más exacto del error, así la ecuación 10 queda de la siguiente manera:

$$E = \bar{X} - P + \Delta E \quad (9)$$

Teniendo en cuenta el documento del cálculo de incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición críticos de la empresa Icobandas s.a. [22], el término  $\Delta E$  está constituido por las fuentes de variación presentadas en la tabla 2, donde se añadió el término de histéresis necesario para la realización de los métodos:

Tabla 2. Fuentes de variación en la comprobación de los equipos

| Origen  | Fuente   | Símb.        |
|---|--|--------------|
| Asociadas al patrón                             | Incertidumbre de calibración                                 | $U_p$        |
|   | Resolución   | $R_p$        |
|   | Variaciones por temperatura                                  | $T_p (*)$    |
|   | La estabilidad   | $Est_p (**)$ |
| Asociadas al instrumento objeto de comprobación | Resolución del instrumento                                   | $R_I$        |
|   | Repetibilidad de las $n$ indicaciones $x_i$ del instrumento. | $\bar{I}$    |
|   | Histéresis   | his          |

|  |  |   |                |
|--|--|---|----------------|
| Asociadas<br>Al montaje<br>De<br>calibración         | Balanzas<br>electrónicas<br>Cintas métricas<br>Calibrador de lonas<br>Cuentametros | Desviación de la temperatura del sistema patrón.<br>-Instrumento respecto a la temperatura de referencia. | $\delta_T (*)$ |
|  | Manómetros<br>Pie de Rey<br>Tensiómetro hidráulico<br>Termómetros                  | Diferencia entre las temperaturas del instrumento y el patrón.  | $\nabla_T (*)$ |
|  | Manómetro y tensiómetro hidráulico   | Variación de la densidad del fluido.  | $\rho (***)$   |
|  |  | Variación de la gravedad.   | $g (***)$      |
| Diferencia de alturas entre las columnas del fluido. |  | $\Delta h (***)$  |                |
| Termómetros  | Homogeneidad térmica del aceite  | $\delta_H$  |                |

(\*) Estas fuentes de variación son corregidas para los patrones, las balanzas, las cintas métricas, los cuentametros, los manómetros, los pie de rey y los calibradores de lona, porque se garantiza un equilibrio térmico del sistema haciendo el montaje con un tiempo de anticipación a la prueba y exceptuando las balanzas, el procedimiento se hace bajo condiciones ambientales controladas. En la comprobación de termómetros estas fuentes no aplican.

(\*\*) La estabilidad de los patrones de presión y temperatura es despreciable frente a las demás fuentes. Para los demás patrones esta fuente de variación no aplica.

(\*\*\*) Se descarta la diferencia de altura en las columnas, la variación de la densidad del fluido y la variación de la gravedad, relacionadas como se muestra en la ecuación 12, debido a que el montaje realizado presenta un  $\Delta h=0$  con lo cual se anula todo el término:

$$P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (10)$$

Igualmente se descarta la repetibilidad si los manómetros de planta son muy robustos.



### 2.8.5 Incertidumbre estándar combinada.

Según la GTC 51 [21], la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando este es obtenido por medio de valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y covarianzas de estas otras magnitudes ponderadas de acuerdo cómo el resultado de la medición varía con respecto a cambios en estas magnitudes. Así la incertidumbre estándar combinada de Y está dada por:

$$U_c^2(Y) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{df}{dx_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (11)$$

Donde,

$U_c$  = incertidumbre estándar combinada

$f$  = función a medir.

$x_i$  = Variable de la función  $f$ .

$u_i$  = incertidumbre estándar de cada variable.

Finalmente se tiene:

$$U_c^2(Y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x)_i]^2 \equiv \sum_{i=1}^n u_i^2(Y) \quad (12)$$

Las derivadas parciales de  $\frac{df}{dx_i}$  son los coeficientes de sensibilidad  $c_i$  que permite que todos los términos de la incertidumbre se encuentren en las mismas unidades de medida además de analizar el valor numérico de cada elemento presente en la incertidumbre y su influencia en ella.

### 2.8.6 Incertidumbre expandida.

Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pudieran ser atribuidos al mensurando. Esto se logra al multiplicar la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura  $k$  así:

$$U = \pm k U_c \quad (13)$$

### **2.8.7 Factor de cobertura k.**

Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida. El factor de cobertura k es un número que refleja los extremos de probabilidad en los que se encuentra el valor medido. Está relacionado con la probabilidad de cobertura y con la distribución estadística del mensurando.

Comúnmente el factor de cobertura usado es de  $k=2$  para un nivel de confianza de 95% (esto si la incertidumbre estándar combinada tiene distribución normal), otros valores pueden ser  $k=1$  para una distribución normal con un nivel de confianza aproximado a 68% y  $k=3$  para un nivel de confianza de aproximadamente 99,7%. Otras formas menos usadas de distribución utilizan otros valores para el factor de cobertura.

### **3. ESTADO INICIAL DEL LABORATORIO**

Los requisitos técnicos de un proceso industrial y/o de sus resultados (productos y servicios) en todas las etapas de su ciclo de vida (comercialización, diseño, fabricación, montaje, entre otros.) se establecen mediante especificaciones que definen intervalos de valores admisibles o tolerancias para las diferentes magnitudes que determinan su calidad. Cada vez que hay que decidir si el valor de una característica está dentro de la tolerancia especificada, es preciso medir con suficiente precisión, fiabilidad y seguridad como para tomar esta decisión con la menor incertidumbre compatible con los condicionantes económicos [23]. Así, la empresa debe garantizar el buen funcionamiento de los equipos de medición de las variables físicas, en este caso temperatura y presión, que al estar relacionadas directamente con el producto final se denominan variables físicas críticas. En vista de esto, el laboratorio de Metrología de Icobandas s.a. se encarga de realizar las comprobaciones internas para las variables de medida involucradas (temperatura y presión) en el proceso industrial por medio de los adecuados equipos de medida. A partir de ellos se observa y se controla el proceso. Dichas mediciones deben ser fiables, seguras y de gran exactitud por lo cual el laboratorio de Metrología cumple con condiciones de temperatura, humedad y polvo controladas, más aún con patrones y personal calificado para realizar las tareas del plan de aseguramiento Metrológico de la empresa que garantiza el buen funcionamiento de los equipos de medida y por consiguiente la buena calidad del producto final.

La instrumentación y documentación descritas a continuación fueron encontradas en el laboratorio al inicio del proyecto.

#### **3.1 INSTRUMENTACIÓN.**

El laboratorio de Metrología de Icobandas s.a. pertenece al Departamento de Mantenimiento, donde se cuenta con equipos e instrumentos de medición confiables para la comprobación de los equipos críticos que garantizan la calidad de los resultados de las mediciones, satisfaciendo así las necesidades como empresa y para beneficio del consumidor.

Para asegurar que las mediciones realizadas sean confiables, los equipos e instrumentos de medición (patrones) deben ser calibrados, es decir, que los resultados de las mediciones realizadas, sean trazables con patrones nacionales o internacionales [24], en laboratorios acreditados pertenecientes a la red Metrológica Colombiana.

### 3.1.1 Temperatura.

Como patrón de temperatura se encontró que el laboratorio cuenta con un termómetro de precisión, de rango  $-199,99^{\circ}\text{C}$  a  $850^{\circ}\text{C}$ , resolución de  $0,01^{\circ}\text{C}$  y la sonda RTD respectiva. Además, de un baño térmico como lo muestra la *figura 3*, el cual fue construido en la empresa Icobandas s.a. con ayuda de dos estudiantes de Ingeniería Física de la Universidad del Cauca, con las características descritas en la *tabla 3*.



Fuente: Propia

*Figura 3.* Baño térmico

*Tabla 3.* Principales características del baño térmico.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Rango de Operación</b>              | 18°C a 199,9°C              |
| <b>Conexiones para los termómetros</b> | 3 conexiones hembra de ¼ in |
| <b>Líquido del Baño</b>                | Aceite térmico              |
| <b>Punto de Inflamación</b>            | 220°C                       |
| <b>Punto de ebullición</b>             | 355°C                       |

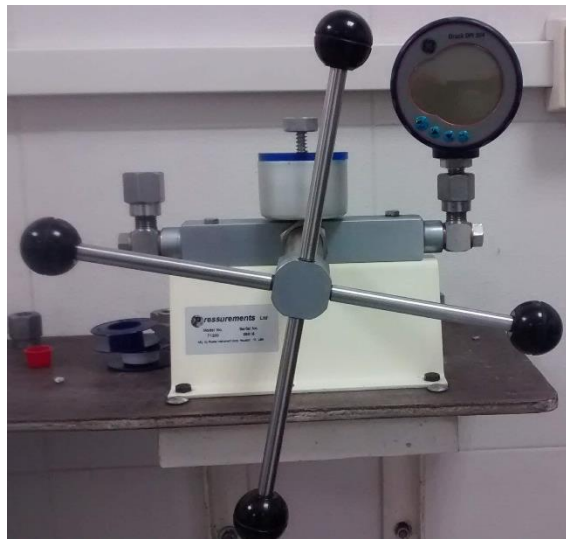
Con los anteriores patrones de temperatura se comprueban los termómetros bimetalógicos críticos, asegurando que el instrumento cumpla con los límites de error aceptados por la empresa, en puntos definidos de acuerdo al rango de trabajo.

### 3.1.2 Presión.

Para la comprobación de los manómetros la empresa cuenta con un manómetro patrón (*Tabla 4*) en un banco comparador de pistón cuyo rango es de 0 psi a 5.000 psi, en el que la presión se hace por medio de un tornillo sin fin que al ser girado con un timón hace presión al aceite que se encuentra dentro del tanque y la transmite a dos conexiones NPT (National Pipe Thread) de 1/2", 1/4", 3/8" o 1/8" en donde se conecta el manómetro patrón y el equipo a comprobar (*Figura 4*).

*Tabla 4.* Principales características del manómetro Patrón.

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Clase (%)</b>                | 0,05      |
| <b>Rango (psi)</b>              | 0 - 5.000 |
| <b>División de Escala (psi)</b> | 0,1       |
| <b>Resolución (psi)</b>         | 0,1       |



Fuente: Propia

*Figura 4.* Banco comparador de presiones con el manómetro Patrón.

Estos elementos se utilizan para la comprobación de los diferentes manómetros de la empresa, cuyos rangos no excedan los 5.000 psi con clase de exactitud mayor o igual a 0,2%.

### **3.2 DOCUMENTACIÓN.**

La documentación presente en el Laboratorio de Metrología de la empresa Icobandas s.a. que sirvió como ayuda para realizar este proyecto corresponde a los instructivos de uso y manejo de todos los instrumentos de medida, especialmente el de los manómetros [25], termómetro BARNANT 90 [26] y termómetro bimetálico [27]. Además, se utilizó el procedimiento de comprobación de los manómetros [28] y de los termómetros [29]. De igual modo, se usó el instructivo para realizar comprobaciones internas [30], instructivo para preservar los patrones [31] y un documento con el cálculo de incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición [22]. Finalmente, se contó con archivos de hojas de calibración para las Pt-100 [32].

Estos documentos sirvieron como referencia para saber el funcionamiento de los patrones y para diseñar el procedimiento de comprobación de las Pt-100 y el transmisor de presión, acorde a los requerimientos de la empresa, teniendo en cuenta los procedimientos realizados a otros equipos y los registros de los instrumentos de medida, a partir de los resultados obtenidos por el software de programación de Metrología.

## **4. EQUIPOS MEDIDORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN DE ICOBANDAS S.A.**

### **4.1 Instrumentos para la medida de temperatura en Icobandas s.a.**

Por el amplio margen de temperatura definido por la EIT90 (Escala Internacional de Temperatura de 1990), no existe un único patrón capaz de reproducirla, de ahí que, sean necesarios diferentes tipos de sensores y medios isotermos para interpolar entre los distintos puntos fijos que la definen.

Como las condiciones de estabilidad, pureza y fabricación de algunos patrones es bastante exigente, solo algunas industrias con gran peso económico podrían mantener estos patrones, sin embargo, se pueden encontrar patrones de trabajo que se aproximen a la EIT90 y a las necesidades industriales con gran precisión y con costos 20 veces inferiores a las exigidas para un patrón primario.

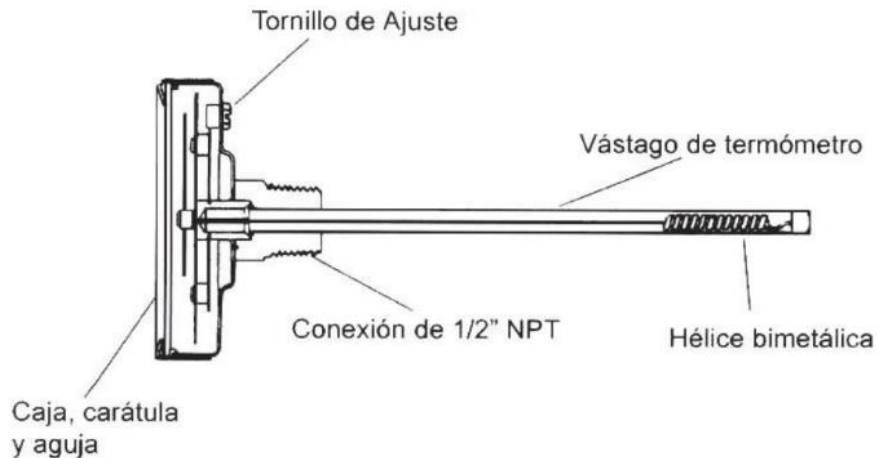
Los patrones que más se usan para medir temperatura son: Termómetros de columna líquido, termómetros de resistencia de platino y termopares, y desde hace unos años termómetros de radiación.

Ahora bien, en la empresa Icobandas s.a. la temperatura es una variable crítica que debe ser controlada constantemente, según los límites de error aceptados por la empresa para garantizar la calidad de sus productos, por consiguiente, se tiene en cuenta las propiedades físicas y químicas de la materia prima al estar expuesta a determinadas temperaturas para la fabricación de las bandas, de ahí la importancia de su medición. Por esta razón, la medida de temperatura se realiza con termómetros bimetálicos o de resistencia de Platino (Pt-100) en la prensa de vulcanización, de modo similar, con termómetros basados en termopares tipo J en el tratamiento del caucho y la lona.

#### **4.1.1 Termómetros Bimetálicos.**

El termómetro bimetálico es un instrumento utilizado para medir temperatura mediante la contracción y expansión de dos distintas aleaciones metálicas de alto y bajo coeficiente de dilatación.

Los termómetros bimetálicos están constituidos por un tubo en cuyo interior está colocada una espiral helicoidal bimetálica. Dicha espiral está soldada por un extremo a la parte inferior del tubo, y por otra, a una varilla de transmisión, a su vez conectada a una aguja indicadora (*Figura 5*).



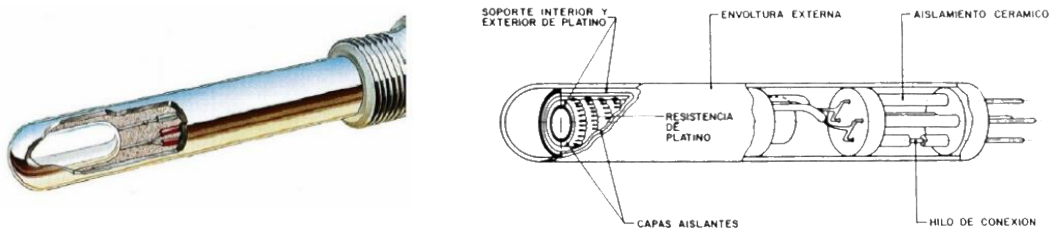
Fuente: Arancibia, M. (2012). Termometría. [Figura].

*Figura 5.* Termómetro Bimetálico

En realidad, lo que mide la temperatura en los termómetros bimetálicos es una hélice bimetálica de respuesta rápida. Dado que el termómetro bimetálico se fabrica a partir de dos tiras de metal soldadas en frío con diversos coeficientes térmicos de expansión, éstas se tuercen en función de la temperatura y el movimiento rotatorio se transfiere con baja fricción a la aguja indicadora [33].

#### 4.1.2 Termómetros de resistencia de platino Pt-100.

Es un instrumento que consta de un sensor, el cual forma parte de un circuito eléctrico cuya resistencia varía con la temperatura, así el alambre de platino a 0°C tiene 100 ohmios, además posee un elemento donde sujetar el sensor, una pantalla protectora para el sensor y cables conectores que unan el sensor al instrumento de medida (*Figura 6*).

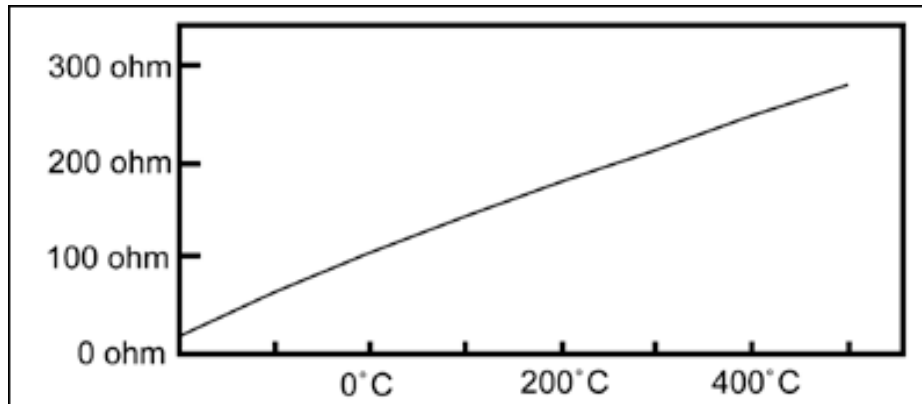


Fuente: López, F. Zurita. R. (2017) Estructura interna de un termómetro de resistencia de platino (PT100).

*Figura 6.* Estructura interna de un termómetro de resistencia de Platino Pt-100.



El incremento de la temperatura no es lineal, pero si creciente y característico del Platino, de tal manera que, mediante tablas, es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde [34]. Su variación de resistencia con respecto a la temperatura se muestra en la *Figura 7*.



Fuente: Murdocca, R. (2009). Laboratorio de Interfaces.

*Figura 7.* Resistencia Vs Temperatura para una Pt-100.

Ahora bien, las Pt-100 son levemente más costosas y mecánicamente menos rígidas que las termocuplas, no obstante, superan a estas en aplicaciones de baja temperatura (-100°C a 200°C), al mismo tiempo que pueden entregar precisiones de una décima de grado y no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, ya que generalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso. Por consiguiente, esto resulta ser una ventaja para los equipos que tienen este comportamiento, donde una desviación no detectada de temperatura podría ocasionar algún daño grave. Por otra parte, una Pt-100 puede ser conectada utilizando un cable de cobre convencional a cierta distancia del medidor, sin mayor problema.

La relación fundamental para su funcionamiento es:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (14)$$

donde

$R_T$  = Resistencia a una temperatura  $T$ .

$R_0$  = Resistencia a 0°C

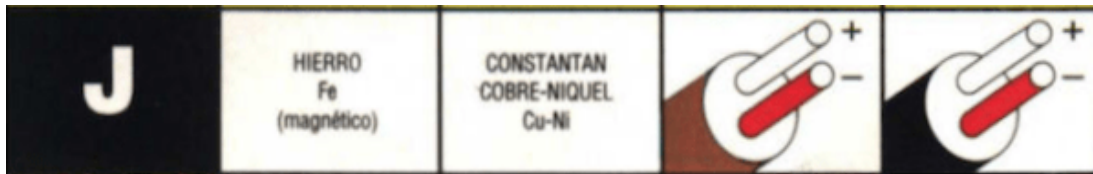
$\alpha$  = Coeficiente térmico de la resistencia del material.

#### 4.1.2.1 Termopar tipo J [35].

Los termopares se constituyen de dos filamentos metálicos de materiales distintos colocados en diferentes posiciones pero unidos por un extremo. Su funcionamiento estriba en 2 extremos: el extremo que conforma el punto de medición o junta caliente y el extremo denominado como punto o junta fría.

Su modo de operar se basa en el efecto Seebeck, para ser más precisos, el efecto termoeléctrico, en el que se transforma directamente la diferencia de temperatura a un voltaje de naturaleza eléctrica. Cuando la junta caliente eleva su temperatura genera un voltaje eléctrico proporcional a los niveles de temperatura predominantes. Dicha generación es posible debido a la diferencia térmica entre la junta fría y caliente, asimismo, a los diferentes materiales con que estas están compuestas. Cabe mencionar que los termopares no dan una medición absoluta del medio sino sólo muestran la temperatura diferencial entre las dos juntas que los constituyen.

El Termopar tipo J (hierro/constantán) es un termopar común de uso general con un rango de temperatura de aproximadamente  $-270/+1200$  °C y una sensibilidad de  $55 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . El color de cables estándar es blanco (+) y rojo (-), como se ve en la *Figura 8*. Su principal inconveniente es la rápida oxidación que sufre el hierro por encima de  $550$  °C; y por debajo de  $0$  °C es necesario tomar precauciones a causa de la condensación de vapor de agua sobre el hierro.



Fuente: Ingeniería Mecafenix la enciclopedia de la Ingeniería. (2017). Sensor de Temperatura Termopar.

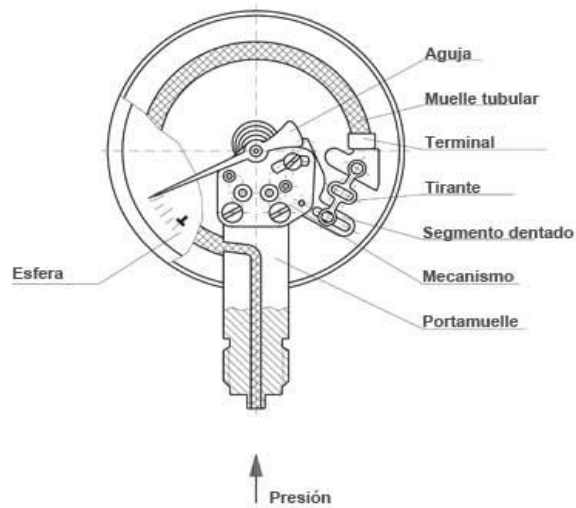
*Figura 8.* Termopar tipo J.

## 4.2 Instrumentos para la medida de Presión en Icobandas s.a.

En Icobandas s.a. es necesario controlar el sistema de producción de sus bandas, y un factor determinante a la hora de su fabricación es la medida de la presión en el proceso de vulcanización en las prensas, de esta manera, la empresa brinda los más altos estándares de calidad en cada producto y elemento de caucho. Esta variable es monitoreada por medio de manómetros de tubo Bourdon, transductores de presión y transmisores de presión.

#### 4.2.1 Manómetro de tubo de Bourdon [36].

El tubo Bourdon (figura 9) es un manómetro mecánico que cuenta con tubos de sección oval y de forma circular que acogen el medio de medición y se deforman a la medida que estén sometidos a presión. El terminal del muelle produce un movimiento en proporción de la presión y transmite la trayectoria mediante un mecanismo a la aguja

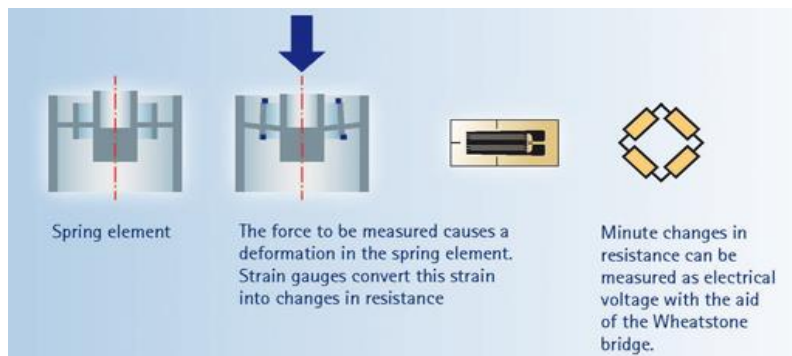


Fuente: Cartie, S. (2013). Funcionamiento de un manómetro.

Figura 9. Tubo Bourdon.

#### 4.2.2 Transductor de presión [37].

Un transductor de presión convierte la magnitud física presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, uno de los más comunes es el transductor extensométrico (figura 10).



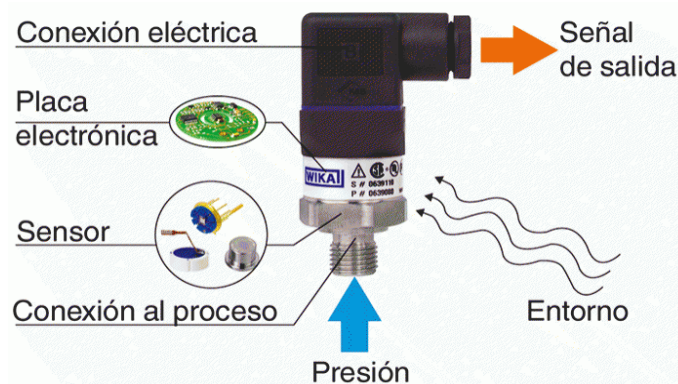
Fuente: HBM. (2017). Funcionamiento de un transductores de fuerza a base de galgas extensométricas.

Figura 10. Funcionamiento de un transductor de fuerza a base de galgas extensométricas.

La conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión de tal manera que, la señal de salida depende de los cambios en la resistencia de las galgas extensométricas y, por lo tanto, tiene una dependencia directa con la fuerza aplicada emitiendo señales sin amplificar como 2 mV o 10mV.

#### 4.2.3 Transmisor de presión [17].

Instrumento que proporciona una señal eléctrica proporcional a la presión medida. Esta señal generalmente en mA, V o mV se ha de leer externamente con un multímetro. Este amplifica dicha señal y la convierte en una señal estandarizada y habitual en la industria como por ejemplo 4...20 mA o a veces 0...10 V. Se trata de un dispositivo estandarizado compuesto por sensor, conexión a proceso, conexión eléctrica y caja de protección. Debido a esta amplificación de la señal son menos susceptibles a interferencias electromagnéticas (figura 11).



Fuente: Nolla, X. (2017). ¿Cómo funciona un transmisor de Presión?

Figura 11. Funcionamiento de un transmisor de presión.

La principal diferencia entre transmisores y transductores de presión es que los transductores de presión dan la señal eléctrica de salida que depende linealmente de la señal eléctrica de entrada, por lo que dependen de la alimentación eléctrica. Los transmisores llevan asociados una electrónica que permite un margen de tensión de alimentación, por ejemplo de 10 a 50 V, sin que varíe la señal de salida.

Los transmisores de presión pueden tener 2, 3 o 4 hilos. El que usa la empresa Icobandas s.a. equivale a uno de 2 hilos con una determinada conexión eléctrica que se especificará más adelante.

## 5. PROCEDIMIENTOS DE COMPROBACIÓN.

### 5.1 PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DEL TERMÓMETRO Pt-100.

Teniendo en cuenta la información tomada de la NTC 4476 [38], NTC 5152 [39], IEC 60751 [40] además de las hojas de calibración para las Pt-100 de laboratorios externos, se logró implementar un método de comprobación para las Pt-100 con el fin de evaluar constantemente su funcionamiento y tomar medidas pertinentes en el caso de que su uso se vea afectado por factores en el ambiente de trabajo.

Se estudió diferentes métodos de comprobación y se concluyó que el termómetro patrón con el que cuenta la empresa además del baño térmico, son instrumentos adecuados para realizar el procedimiento.

Además, para dicho procedimiento es necesario la medida de resistencia ( $\Omega$ ) ya que a medida que varía la temperatura en la Pt-100 la resistencia también cambia. Debido a ello, esta variable dependiente se midió con un multímetro patrón, escogido bajo los criterios requeridos y el cual fue adquirido con una resolución de 51/2 dígitos y un rango de 200  $\Omega$  ~ 100 M $\Omega$ , con el cual se implementó el procedimiento de comprobación para las Pt-100.

Una vez acondicionados los instrumentos para la comprobación, se procedió a escoger los puntos de evaluación teniendo en cuenta el rango de trabajo de las RTD en la empresa, de igual modo se definió un límite de error de 2,5 °C (1/2 de la tolerancia de trabajo).

A continuación, se desarrolló el modelo necesario para el cálculo de incertidumbre en la comprobación del termómetro de resistencia Pt-100 mediante el método de comparación con termómetro patrón en baño térmico de temperatura estable y uniforme, semejante a el montaje que se muestra en la figura 12 y teniendo en cuenta que, los rangos de trabajo no excedieran los 200°C al relacionar la temperatura con la medida de resistencia que aporta el multímetro patrón.



Fuente: Propia

Figura 12. Montaje para la comprobación de las Pt-100.

Por otro lado, en el término  $\Delta E$  de la ecuación (10) no se consideran las fuentes de error descartadas en el capítulo 2 y el aporte al cálculo de la incertidumbre por la resolución de los patrones no se tiene en cuenta ya que esta se estima en la incertidumbre de calibración del mismo y es independiente del observador por ser instrumentos digitales.

Del mismo modo se realizó un estudio de la homogeneidad y estabilidad del aceite en el baño térmico, superando las exigencias del proceso productivo de la empresa. En primer lugar, se midió la homogeneidad con un valor de temperatura fijo para diferentes puntos en el aceite y luego, para la estabilidad se midió la temperatura en un valor determinado en donde el equipo patrón alcanzó un valor fijo en poco tiempo.

Partiendo de las fuentes de variación identificadas en la tabla 2, donde no se consideran para el término  $\Delta E$  de la ecuación (10), y las fuentes ya descartadas, se obtiene:

$$E = \bar{I} - P + (U_P + R_P + R_I + his) \quad (17)$$

En este caso la incertidumbre estándar combinada aplicando la ecuación (13) es:

$$U_c^2(E) = C_2^2 u_2^2(\bar{I}) + C_1^2 u_1^2(U_P) + C_3^2 u_3^2(R_I) + C_4^2 u_4^2(R_P) + C_5^2 u_5^2(his) \quad (18)$$

Multiplicando la incertidumbre estándar combinada de la Pt-100 por el factor de cobertura  $k=2$  para un nivel de confianza de 95% definido para la empresa, y aplicando la comprobación de los parámetros de la tabla 5, se obtiene:

$$U = 2 \times \sqrt{\left(\frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{R_I}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R_P}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{his}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2} \quad (19)$$

Tabla 5. Parámetros de la incertidumbre para la comprobación de las pt-100.

| Nombre de la Variable ( $x_i$ )         | Coefficiente de Sensibilidad ( $C_i$ )                 | $U_i$   | Observaciones   |
|---|--|---|---|
| Incertidumbre de Calibración del Patrón | $\left \frac{\partial E}{\partial U_P}\right  = 1$     | $\frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}$ | Distribución Normal.<br>$k_{\text{certificado}}$ : Indicado en el certificado de calibración del Patrón.  |
| Repetibilidad de Las n indicaciones     | $\left \frac{\partial E}{\partial \bar{I}}\right  = 1$ | $\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$                         | Distribución Normal   |
| Resolución Instrumento                  | $\left \frac{\partial E}{\partial R_I}\right  = 1$     | $\frac{R_I}{2 \times \sqrt{3}}$                         | Distribución Rectangular.<br>$R_I$ : Resolución del instrumento.  |
| Resolución del Patrón.                  | $\left \frac{\partial E}{\partial R_P}\right  = 1$     | $\frac{R_P}{2 \times \sqrt{3}}$                         | Distribución Rectangular.<br>$R_P$ : Resolución del Patrón.   |
| Histéresis del medidor.                 | $\left \frac{\partial E}{\partial his}\right  = 1$     | $\frac{his}{2 \times \sqrt{3}}$                         | Distribución Rectangular<br>$his =  \bar{T}_{Baj} - \bar{T}_{Sub} $<br>$his$ : Histéresis del medidor.<br>$\bar{T}_{Baj}$ : Media de las indicaciones del instrumento para una misma temperatura en descenso.<br>$\bar{T}_{Sub}$ : Media de las indicaciones del instrumento para una misma temperatura en ascenso. |

Con base en lo anterior se elaboró el procedimiento de comprobación para la Pt-100 de la empresa Icobandas s.a. descrito en el ANEXO A, con el fin de asegurar que estos instrumentos cumplan con los límites de error aceptados por la empresa y además que dicho procedimiento pueda ser realizado por el personal del departamento de Metrología, de una manera ágil y confiable, donde los datos de esta prueba puedan ser digitados a través del software, que permite identificar el estado del equipo.

## **5.2 PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.**

El transmisor de presión puede presentar fallas en su lectura debido al uso continuo, ya sea en sus conexiones mecánicas, eléctricas o debido al polvo, vibración y humedad, que pueden afectar su funcionamiento. Por lo cual, el Departamento de Mantenimiento de la empresa Icobandas s.a. requiere diseñar e implementar un procedimiento de comprobación para dichos instrumentos.

Para la realización del procedimiento de comprobación se tuvo en cuenta las normas IEC 60770 [41], EN 61326 [42] y la documentación existente sobre procedimientos similares para las características del transmisor, adecuándola a los requerimientos de la empresa.

Después del estudio se estableció que el manómetro patrón con el que cuenta la empresa es óptimo para utilizarlo en el procedimiento, al igual que el multímetro patrón obtenido con el fin de medir corriente en el instrumento crítico con un rango de  $200\mu\text{A} \sim 10\text{A}$ .

Se determinó que la comprobación se realizará a 6 puntos igualmente distribuidos en el rango de trabajo, incluido el cero, los cuales son: 0, 600, 800, 1000, 1200 y 1400 (psi) para los transmisores de presión de 2 hilos con salida lineal cuyos rangos no excedan los 5000 psi y donde el porcentaje de error de linealidad no debe ser mayor a la clase del transmisor de presión a comprobar ( $\pm 0,5\%$ ).

Adicionalmente, se elaboró el procedimiento para el cálculo de la incertidumbre de la comprobación del transmisor de presión basándose en el capítulo 2.

Mediante el método de comparación con el manómetro patrón y un banco comparador de presiones al mismo tiempo, de la ayuda de un multímetro patrón para medir la salida del transmisor en unidades de corriente (mA) se realizó el montaje como se muestra en la siguiente figura:





Fuente: Propia

Figura 13. Montaje para la comprobación de los transmisores

Se consideran las fuentes de variación identificadas en la tabla 2, descartando la diferencia de altura en las columnas, la variación de la densidad del fluido y la variación de la gravedad, relacionadas como se muestra en la ecuación (11), debido a que el montaje realizado presenta un  $\Delta h = 0$  con lo cual todo el término se anula.

De esta manera, se obtiene la función error así:

$$E = \bar{I} - P + (U_P + R_P + R_{TP} + U_{AP} + his) \quad (20)$$

La incertidumbre estándar combinada del error ( $U_c(E)$ ), empleando el método tipo B, teniendo en cuenta las anteriores consideraciones y reemplazando la ecuación (13), es:

$$U_c^2(E) = C_1^2 u_1^2(U_P) + C_2^2 u_2^2(R_P) + C_3^2 u_3^2(R_{TP}) + C_4^2 u_4^2(U_{AP}) + C_5^2 u_5^2(\bar{I}) + C_6^2 u_6^2(his) \quad (21)$$

En la tabla 6 se puede encontrar la definición de estos términos.

Multiplicando la incertidumbre estándar combinada del transmisor de presión por el factor de cobertura  $k=2$  definido para la empresa para un nivel de confianza del 95%, y aplicando la comprobación de los parámetros de la tabla 6, se obtiene:

$$U = 2 \times \sqrt{\left(\frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}\right)^2 + \left(\frac{R_P}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R_{TP}}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot \frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}\right)^2 + \left(\frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{his}{2 \times \sqrt{3}}\right)^2} \quad (22)$$

Tabla 6. Parámetros de la incertidumbre para la comprobación del transmisor de presión.

| Nombre de la Variable ( $x_i$ )                      | Coefficiente de Sensibilidad ( $C_i$ )                   | $U_i$  | Observaciones  |
|--|--|--|--|
| Incertidumbre de Calibración del Patrón              | $\left  \frac{\partial E}{\partial U_p} \right  = 1$     | $\frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}$                                | Distribución Normal.<br>$k_{\text{certificado}}$ : Indicado en el certificado de calibración del Patrón.   |
| Resolución del Patrón                                | $\left  \frac{\partial E}{\partial R_p} \right  = 1$     | $\frac{R_p}{2 \times \sqrt{3}}$  | Distribución Rectangular<br>$R_p$ : Resolución del Patrón.   |
| Resolución del medidor                               | $\left  \frac{\partial E}{\partial R_{TP}} \right  = 1$  | $\frac{R_{TP}}{2 \times \sqrt{3}}$   | Distribución Rectangular.<br>$R_{TP} = \frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot R_{AP}$<br>$R_{TP}$ : Resolución del Transmisor de Presión<br>$r_{TP}$ : Rango de medida del instrumento en unidades de presión<br>$L_E$ : Mayor valor del rango eléctrico.<br>$l_E$ : Menor valor del rango eléctrico.<br>$R_{AP}$ : Resolución del Amperímetro Patrón. |
| Incertidumbre de calibración del Amperímetro Patrón. | $\left  \frac{\partial E}{\partial U_{AP}} \right  = 1$  | $\frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot \frac{U_{\text{certificado}}}{k_{\text{certificado}}}$ | Distribución Normal.<br>$k_{\text{certificado}}$ : Indicado en el certificado de calibración del Amperímetro Patrón.   |
| Repetibilidad de Las n indicaciones                  | $\left  \frac{\partial E}{\partial \bar{I}} \right  = 1$ | $\frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$                         | Distribución Normal.   |

|                         |  |                                 |   |
|-------------------------|--|---------------------------------|---|
| Histéresis del medidor. | $\left  \frac{\partial E}{\partial his} \right  = 1$ | $\frac{his}{2 \times \sqrt{3}}$ | Distribución Rectangular<br>$his = \frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot  \bar{I}_{Baj} - \bar{I}_{Sub} $<br><i>his</i> : Histéresis del medidor.<br>$\bar{I}_{Baj}$ : Media de las indicaciones del Amperímetro para una misma presión en descenso.<br>$\bar{I}_{Sub}$ : Media de las indicaciones del Amperímetro para una misma presión en ascenso. |
|-------------------------|--|---------------------------------|---|

La anterior información fue tomada en cuenta para la realización del procedimiento de comprobación del transmisor de presión, presente en el ANEXO B, que se realizó con el fin de asegurar que el instrumento cumpla con los límites de error aceptados por la empresa, mediante un método que describe de manera clara los pasos a seguir por el personal de Metrología, con el propósito de obtener los datos necesarios para ingresar en el software que se encarga de calcular la incertidumbre y arrojar el estado final del transmisor de presión con salida eléctrica.

## 6. SOFTWARE DE COMPROBACIÓN.

Para el desarrollo de la herramienta software se tuvo en cuenta los procedimientos de comprobación elaborados para la Pt-100 y el transmisor de presión como se indica en el capítulo 5 para cada equipo crítico, así como los modelos matemáticos necesarios para el desarrollo del programa en el editor de Visual Basic de Excel 2007, como se explica a continuación.

### 6.1 MODELO DE MEDICIÓN PARA TERMOMETROS DE RESISTENCIA Pt-100

Para estandarizar la relación resistencia versus temperatura, se designó un modelo matemático basado en la interpolación de RTD llamado el método de Callendar-Van Dusen descrito por estos dos investigadores entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

La ecuación de Callendar- Van Dusen es utilizada en la norma IEC 60751 [40], donde la no linealidad de un termómetro de resistencia de platino puede ser expresado mediante el siguiente polinomio:

$$R_T = R_0 + R_0AT + R_0BT^2 + R_0CT^3(T - 100) \quad (23)$$

Donde C=0 ya que solo aplica para  $T < 0^\circ\text{C}$

Los coeficientes A, B, y C para un sensor estándar se especifican en la norma IEC60751.

Para la comprobación, es necesario expresar el conjunto de coeficientes  $R_0$ , A, B y C propios o característicos de ese termómetro particular (Pt-100), usando el método de comparación.

Así, para el caso de  $t \geq 0^\circ\text{C}$  el cálculo de coeficientes se reduce a tres coeficientes:  $R_0$ , A y B, como lo muestra la ecuación (24):

$$R_T = R_0 + R_0AT + R_0BT^2 \quad (24)$$

Luego, tomando los valores de resistencia ( $\Omega$ ) para temperaturas desde 60°C a 155°C se aplica el metodo de minimos cuadrados y se halla el  $R_0$  que corresponde a la resistencia de la Pt-100 a 0°C (100 $\Omega$  aprox.) con el cual hallamos A y B.

Otra forma de la ecuación de Callendar Van-Dusen es:

$$R_T = R_0 + \alpha R_0 \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right)^3 \right] \quad (25)$$

De la cual se obtiene por comparación directa los coeficientes:

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100} \quad (26)$$

$$B = -\frac{\alpha \delta}{100^2} \quad (27)$$

$$C = -\frac{\alpha \beta}{100^4} \quad (28)$$

A partir de las ecuaciones (26), (27) y (28) se tiene la solución para los coeficientes  $\alpha$  y  $\delta$  ya que  $\beta = 0$  porque  $C = 0$ , coeficientes que para una termoresistencia Pt-100 se especifican en la norma IEC 60751 y a la escala ITS-90 y se pueden calcular de acuerdo a la ecuación (29) y (30):

$$\alpha = A + 100B \quad (29)$$

$$\delta = \frac{-100^2 B}{\alpha} \quad (30)$$

Una vez calculados los coeficientes se pueden comparar con la norma EN 60751 (Tabla 7) que proporciona valores para los coeficientes:

Tabla 7. Conjunto de coeficientes estándar para la Pt-100 según la norma EN 60751.

| <b>Conjunto de coeficientes según la norma EN 60751 y la escala de la ITS-90</b> |  |          |   |
|--|--|----------|---|
| A  | $3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$   | $\alpha$ | $0,003850 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| B  | $-5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$   | $\delta$ | $1,4999 \text{ } ^\circ\text{C}$        |
| C  | $-4,1830 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ | $\beta$  | $0,10863$                               |

### 6.1.1 Cálculo del valor de temperatura a partir de su resistencia

Para su aplicación como sensor de temperatura, la termorresistencia Pt-100 precisa definir el valor de temperatura en función de su valor de resistencia, en este caso para los 3 puntos a comprobar que son 141,146 y 151 °C.

La variación de resistencia eléctrica en función de la Temperatura para  $T > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  se desprende a partir de la expresión (24) así:

$$R_0 B T^2 + R_0 A T + (R_0 - R_T) = 0 \quad (31)$$

Dividiendo entre  $R_0 B$  queda que:

$$T^2 + \frac{R_0 A}{R_0 B} T + \frac{(R_0 - R_T)}{R_0 B} = 0 \quad (32)$$

Entonces la ecuación cuadrática queda:

$$T^2 + \frac{A}{B} T + \frac{(R_0 - R_T)}{R_0 B} = 0 \quad (33)$$

Al resolver la ecuación [33] se tiene que:

$$T = \frac{-\frac{A}{B} \pm \sqrt{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 4\left(\frac{(R_0 - R_T)}{R_0 B}\right)}}{2} \quad (34)$$

De la ecuación (34) se obtienen dos valores para la T teorica en funcion de la resistencia medida, donde se tiene en cuenta la raiz positiva para el valor negativo de B y la raiz negativa para el valor positivo de B siempre que este valor no se aleje de manera significativa del que corresponde a la norma descrita en la tabla 7.

Una vez realizado este modelo de medición mediante el software utilizado por la empresa, este procede a hacer los respectivos cálculos de incertidumbre de acuerdo con el capítulo 2 y se debe diligenciar el formato estado de los equipos de seguimiento y medición críticos [43].

## 6.2 MODELO DE MEDICIÓN PARA TRANSMISOR DE PRESIÓN.

A continuación se presenta el modelo matemático seguido para comprobar el transmisor de presión ajustado según la norma EN 61326 [42] con las siguientes características:

Clase: 0.5% FE

Rango: 0 a 5.000 Psi

Marca: Huba Control

Modelo: 511.954603745

Entrada: 8-33 VDC

Salida: 4-20 mA

En este proceso se realiza la comprobación a 6 puntos igualmente distribuidos en el rango de trabajo, incluido el cero.

Una de las características es que los transmisores con salida de corriente suministran 4 mA en la parte inferior de la escala y 20 mA en la parte alta, de tal manera que al tomar valores de corriente en mA de manera ascendente y descendente para cada punto a comprobar, se debe tener una relación entre la presión medida por el patrón  $P$  y la señal de salida eléctrica  $I$  del instrumento a comprobar, con lo cual tenemos que:

$$P = \frac{r_{TP}}{L_E - l_E} (I - l_E) \quad (35)$$

Donde,

$r_{TP}$ : Rango de medida del instrumento en unidades de presión

$L_E$ : Mayor valor del rango eléctrico.

$l_E$ : Menor valor del rango eléctrico.

$I$ : Indicación del Amperímetro para una determinada presión.

Una vez realizado este cálculo por el software utilizado en la empresa se obtienen los valores de presión indicados por el transmisor de presión cuyo promedio se comparan con los valores indicados por el manómetro patrón con la respectiva corrección de la medida.

Posteriormente, se procede a hallar la incertidumbre teniendo en cuenta las diferentes fuentes de variación en la comprobación de los equipos de acuerdo con el capítulo 2, y se debe diligenciar el formato estado de los equipos de seguimiento y medición críticos [43].

### **6.3 VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE.**

Hecho el menú principal del software, este permite seleccionar el equipo a comprobar por medio de la identificación asignada por la empresa [44]. Una vez seleccionado el instrumento al cual se le realizará el procedimiento, el usuario encontrará la barra de menú principal el cual es general para todos los métodos de comprobación. Son seis funciones en el menú (*6 botones*) los cuales permiten ver equipos, editar equipos, realizar comprobación, ver protocolo y ver formato.

Al iniciar la comprobación se despliega un formato propio para cada instrumento donde están los datos técnicos del equipo, el procedimiento, los equipos utilizados y los puntos a comprobar. Además, se especifica la inspección visual que permite describir la apariencia general del equipo, la ejecución que indica las fechas de la última, actual y próxima evaluación, las condiciones ambientales del lugar al momento de hacer la prueba y las lecturas necesarias para realizar la comprobación.

Después de registrar los datos, el software es capaz de obtener los resultados como son: el error máximo permitido, la incertidumbre, el porcentaje de error de linealidad, el porcentaje de error de histéresis, basándose en los criterios de aceptación definidos en los procedimientos realizados.

Finalmente, el software es capaz de imprimir un protocolo (ANEXO C y ANEXO D) según el equipo comprobado y guardar la última evaluación a la que se puede acceder con el código del equipo.

El software realizado para cada equipo (Pt-100 y Transmisor de presión), incluye un manual de usuario, cuyo funcionamiento se puede observar en el siguiente diagrama:



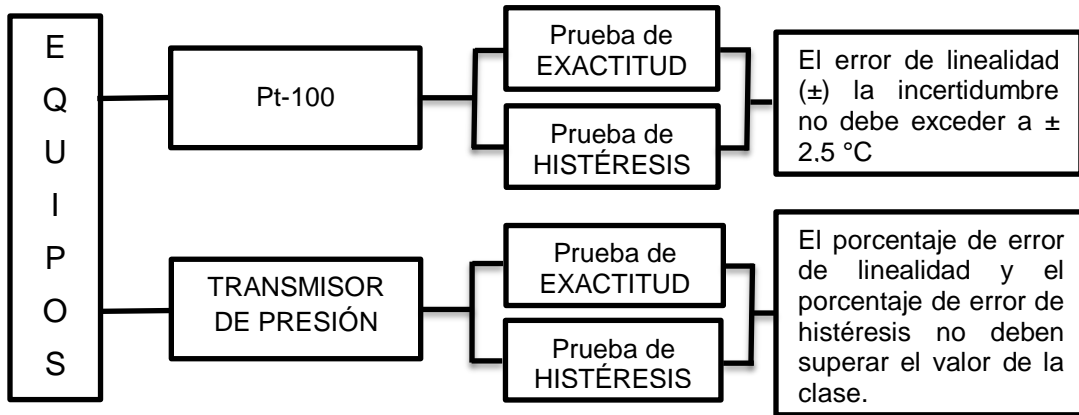


Figura 14. Diagrama de comprobación de equipos.

A partir de los procedimientos descritos anteriormente, se implementó la comprobación de las Pt-100 y transmisor de presión, como lo muestran los ANEXOS A y B respectivamente. Después de realizar las diferentes pruebas se obtuvo resultados como los que se muestran a continuación:

Tabla 8. Prueba de comprobación de Pt-100

| Conjunto de coeficientes experimentales |   |                        |  |
|---|---|------------------------|--|
| <b>A</b>                                | $3.92 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  | $\alpha$               | $3.86 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| <b>B</b>                                | $-6.51 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ | $\delta$               | 1,688 °C   |
| <b>C</b>                                | 0   | $\beta$                | 0  |
| Resultados                              |   |                        |  |
| Error máximo                            | ±2.5  | % Error de histéresis. | 0.24   |
| Incertidumbre                           | ±0.53   | Resultado final.       | PASA   |

## GRAFICO DE RESULTADOS

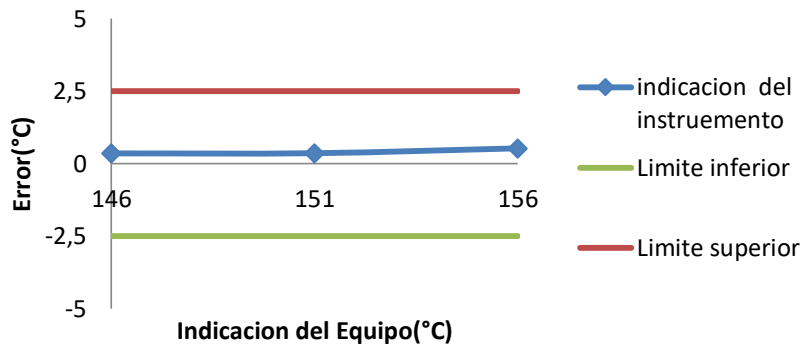


Figura 15. Error Vs. Temperatura para la prueba de comprobación de una Pt-100.

La figura 15 muestra el comportamiento de una Pt-100 utilizada para realizar la prueba de comprobación con rango de 146 a 151 °C y tolerancia de 5°C, evaluada en 141°C, 146°C y 151°C con lo que se cubre el rango de trabajo del equipo. El error máximo permitido es de  $\pm 2,5$  °C que corresponde al  $\frac{1}{2}$  de la tolerancia de trabajo.

Tabla 9. Prueba de la comprobación de Transmisor de presión.

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>% Error máximo</b>         | $\pm 0.4$  |
| <b>% Error de linealidad.</b> | 0.0        |
| <b>% Error de histéresis.</b> | $\pm 0.10$ |
| <b>Resultado final.</b>       | PASA       |

## GRAFICA DE RESULTADOS

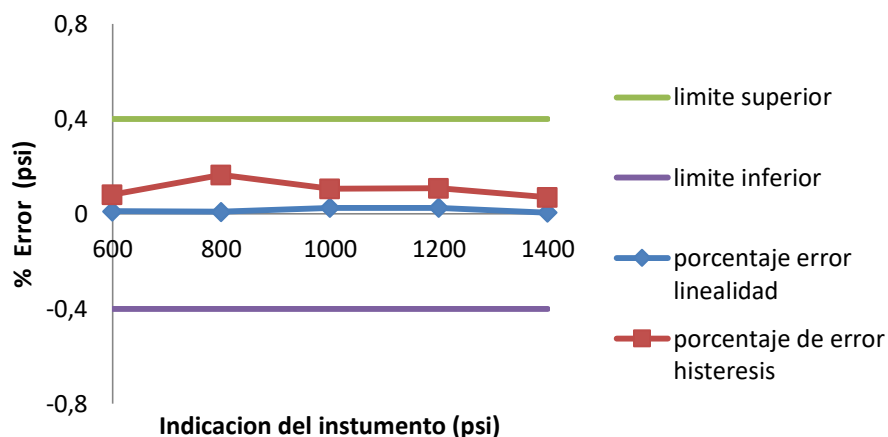


Figura 16. Error Vs. Presión para la prueba de comprobación del Transmisor de presión.

La prueba que se realizó al Transmisor de presión con clase de exactitud menor de 0,5% cuyo rango no exceda 5.000 Psi, se muestra en la figura 16, donde los puntos de evaluación corresponden a 600, 800, 1000, 1200 y 1400 Psi con lo que se cubre el rango de trabajo del equipo y el error máximo permitido está dado por  $\pm 0,4\%$  de dicho rango.

## CONCLUSIONES

Una vez identificados los equipos críticos medidores de temperatura y presión de Icobandas s.a. fue posible identificar los elementos necesarios para realizar la comprobación de los instrumentos y los equipos que se debían implementar en el laboratorio de Metrología para lograr disminuir la contribución a la incertidumbre por resolución del patrón.

Después de establecer el método de comprobación para cada equipo medidor de temperatura y presión, se desarrolló un modelo general para el cálculo de incertidumbre, teniendo en cuenta las fuentes de variación, necesarias para reportar una incertidumbre que se encuentra dentro de los límites de error permitidos por la empresa.

Al realizar los procedimientos de comprobación de acuerdo a las características de los equipos y al uso que estos tienen en el proceso de producción de la empresa, se logró obtener una mayor confiabilidad de la medida, beneficiando la calidad de los productos y brindando mayor rentabilidad para la empresa al realizar estas comprobaciones de manera interna y no en laboratorios externos.

Basándose en los procedimientos de comprobación realizados, se logró desarrollar una herramienta software, que permite al metrologo registrar los datos de las pruebas y obtener los resultados de manera rápida y eficiente.

Las pruebas realizadas a los equipos críticos fueron exitosas ya que todos los resultados obtenidos se dieron de forma coherente dentro de los cálculos de incertidumbre en el que fueron evaluados, teniendo en cuenta el modelo matemático y las características del instrumento.

## RECOMENDACIONES

Una vez concluido el trabajo, se considera importante mejorar la capacidad de medición del laboratorio de Metrología de la empresa Icobandas s.a. en cuanto a las condiciones de estabilidad en algunas pruebas, en otras palabras, caracterizando y controlando en cada caso, los efectos que contribuyen a incrementar la incertidumbre de una comprobación. Por ejemplo, en las medidas con el baño térmico, sería necesario mejorar su desempeño contando con equipo para monitorear, medir y registrar las condiciones ambientales u otras magnitudes de influencia durante el procedimiento de comprobación, ya que sería muy importante poder realizar las correcciones necesarias para dicha prueba y así disminuir el valor de la incertidumbre.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Centro Español de Metrología (CEM), ¿Qué es la metrología?, España, 2012.
- [2] Luis Alfredo Rodríguez, Metrología: Conceptos y definiciones, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de ciencias Básicas, Colombia, 2007.
- [3] Superintendencia de Industria y Comercio, Reglamentos técnicos y Metrología legal, Colombia, 2015, [www.sic.gov.co/metrologia-legal](http://www.sic.gov.co/metrologia-legal).
- [4] David Castellví Calzas, Automatización del proceso de calibración de RTDs mediante Labview, España, 2015.
- [5] Pérez Gonzales Eduardo, El día mundial de la metrología y el BIPM, Boletín Científico Técnico INIMET, Cuba, 2010.
- [6] Instituto Nacional de Metrología de Colombia, creación, objetivos y funciones del INM, Colombia, 2014.
- [7] Centro Español de Metrología CEM, uso del concepto de trazabilidad metrológica por los laboratorios de calibración, España, 2015.
- [8] Hiru.eus, Concepto y medida de la temperatura, España, <https://www.hiru.eus/es/fisica/concepto-y-medida-de-la-temperatura>.
- [9] Ciro Alberto Sánchez Morales, ¿Por qué decir grados Celsius al hablar de grados de temperatura?, Instituto Nacional de Metrología de Colombia INM, Colombia, 2014.
- [10] Raquel Terol, Sistema de calibración de equipos de medida de temperatura, Universitat Rovira i Virgili, España, 2005.
- [11] Gerardo Antonio Goicochea de la Cruz, “Desarrollo de un procedimiento de calibración para termómetros digitales usados como patrones de referencia, estimación de su incertidumbre y validación”, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2014.
- [12] Metas y Metrólogos Asociados MetAs, Callendar + Van Dusen Modelo de medición para termómetros de resistencia, México, 2009.
- [13] Ciro Alberto Sanchez, Calibración de un termómetro de resistencia de platino según los coeficientes de Callendar Van Dusen, Instituto Nacional de Metrología de Colombia, Colombia, 2016.
- [14] Metas y Metrólogos Asociados MetAs, Sistemas termales para calibración de temperatura, México, 2004.
- [15] Jhon R. Howell, Richard O. Buckius, Principios de termodinámica para ingenieros, McGraw-Hill, Mexico, 1990.

- [16] Oscar Marino Quintero Arango, Protocolo técnico para mantenimiento de transmisores de presión, nivel, temperatura y válvulas tipo mariposa y globo con marca específica, en el ingenio Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, Colombia, 2011.
- [17] Centro Español de Metrología CEM, Procedimiento ME-017 para la calibración de transmisores de presión con salida eléctrica, España.
- [18] Metas y Metrologos Asociados MetAs, Métodos de medición, prueba y calibración, México, 2005.
- [19] ICONTEC, NTC-ISO-IEC 17025: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, Colombia, 2017.
- [20] Centro Español de Metrología CEM, Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, España, 2008.
- [21] ICONTEC, GTC 51: Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones, Colombia, 1997.
- [22] ICOBANDAS S.A., PR-GM-20, Cálculo de incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición críticos, Colombia, 2015.
- [23] Adolfo Hilario, Pablo J. Carbonell, Calibración de equipos de medida según ISO 9000, Universidad Politécnica de Valencia.
- [24] ICONTEC, Laboratorios, Colombia, 2016.
- [25] ICOBANDAS S.A., IN-GM-12, Instructivo de uso y manejo del Manómetro, Colombia, 2004.
- [26] ICOBANDAS S.A., IN-GM-19, Instructivo de uso y manejo del termómetro BARNANT 90, Colombia, 2004.
- [27] ICOBANDAS S.A., IN-GM-20, Instructivo de uso y manejo del termómetro bimetalico, Colombia, 2004.
- [28] ICOBANDAS S.A., PR-GM-09, Comprobación de los manómetros, Colombia, 2013.
- [29] ICOBANDAS S.A., PR-GM-12, Comprobación de los Termómetros, Colombia, 2013.
- [30] ICOBANDAS S.A., IN-GM-21, Instructivo para realizar comprobaciones internas, Colombia, 2013.
- [31] ICOBANDAS S.A., IN-GM-22, Instructivo para preservar los patrones, Colombia, 2013.
- [32] Laboratorio de Metrología, Corporación Metrocalidad, Univalle, Colombia 2017.

- [33] Artículos Quiminet.com, Los termómetros bimetálicos y su modo de funcionamiento, 2013, <https://www.quiminet.com/articulos/los-termometros-bimetalicos-y-su-modo-de-funcionamiento-3516632.htm>.
- [34] SRC, ¿Qué es un sensor Pt-100?, España, 2016.
- [35] JM Industrial Technology S.A. de C.V., Termopar tipo J, México, 2019.
- [36] Blog de Wika, ¿Cómo funcionan los manómetros mecánicos?, España, 2015.
- [37] OMEGA, Transductor de Presión, España, 2019.
- [38] ICONTEC, NTC 4476: Métodos de ensayo para la inspección y verificación de termómetros, Colombia, 1998.
- [39] ICONTEC, NTC 5152: Métodos de ensayo para termómetros industriales de resistencia, Colombia, 2011.
- [40] International Standard, IEC 60751: Termómetros de resistencia de platino industriales y sensores de temperatura de platino, 2008.
- [41] International Standard, IEC 60770: Transmisores para uso en sistemas de control de procesos industriales, 2010.
- [42] International Standard, IEC: 61326: Equipos eléctricos para medición, control y uso en laboratorio. Requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC), 2012.
- [43] ICOBANDAS S.A., FR-GM-20: Estado de los equipos de seguimiento y medición críticos, Colombia.
- [44] ICOBANDAS S.A., PR-GM-02: Procedimiento de Metrología, Colombia, 2013.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. Procedimiento de comprobación para la Pt-100**

#### **1. OBJETIVO**

En este procedimiento se define el método para la comprobación de las PT-100 de **Icobandas s.a.**, asegurando que el instrumento cumpla con los límites de error aceptados por la empresa.

#### **2. ALCANCE**

El presente procedimiento cubre los pasos para la comprobación de las PT-100 usadas en la empresa, mediante el método de comparación con termómetro patrón en baño térmico de temperatura estable y uniforme, cuyos rangos de trabajo no excedan los 200°C y división de escala mínima de 0,1°C.

#### **3. DEFINICIONES**

**PT-100 (RTD).** Instrumento para medir la temperatura, que consta de un sensor, el cual forma parte de un circuito eléctrico cuya resistencia varía con la temperatura, un elemento donde sujetar el sensor y una pantalla protectora para el sensor y cables que unan el sensor al instrumento de medida.

**Termómetro Patrón.** Termómetro certificado por un organismo acreditado que garantice la trazabilidad de la medida.

**Temperatura.** Es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia que depende del nivel de agitación de las mismas, puede ser medida con un instrumento denominado termómetro.

#### **4. CONDICIONES GENERALES**

##### **4.1 Elementos necesarios para la comprobación**

- Baño térmico.
- Termómetro patrón de precisión con rango de 0°C a 400°C y división de escala de 0,1°C.
- Punta de inmersión RTD.
- Multímetro patrón de precisión.
- Paños para la limpieza.



## **4.2 OPERACIONES PRELIMINARES**

**4.2.1 Condiciones generales.** Asegúrese que el área de trabajo y la base en la que está soportado el baño térmico sea firme, nivelada y despejada de elementos o condiciones que puedan incidir negativamente en la lectura del termómetro patrón y de la medida de resistencia para la PT-100.

**4.2.2 Limpieza.** Antes de proceder con la comprobación de la PT-100 se someterá a una operación de limpieza tanto el RTD como el termómetro patrón que elimine toda la suciedad, los equipos se deben limpiar con un paño suave humedecido, luego se deben de secar con una bayetilla, lanilla o dulce abrigo.

**4.2.3 Inspección visual.** Se realizará una inspección visual sobre el estado del instrumento, para comprobar su buen estado, sin la presencia de defectos, deformaciones, malos contactos, cables de conexión rotos, entre otros.

Si el instrumento presenta manchas profundas de óxido o alguno de los defectos anteriormente mencionados entonces NO PASA y debe ser reemplazado por uno, en buen estado el cual se le debe realizar el presente procedimiento.

**4.2.4 Estabilización de los instrumentos.** Se corrobora que la instrumentación involucrada en la medición se halle en estado operativo, respetando luego de su encendido, un intervalo de estabilización de al menos 10 minutos.

## **5. DESARROLLO**

### **5.1 PROCEDIMIENTO CON EL BAÑO TÉRMICO**

Asegúrese que la unidad de mantenimiento del motor neumático contenga suficiente aceite y no se encuentre con gran cantidad de agua. El nivel de aceite en el tanque del baño térmico a temperatura ambiente debe ser 20,5 cm aproximadamente, de tal forma que cuando se alcancen los puntos más elevados, este no se derrame. Así también se asegura que, para los puntos más bajos, los bulbos de los termómetros están sumergidos en el aceite por lo menos en 2/3 de su longitud, siendo que el bulbo más corto es de 4".

Cuando termine de realizar el ensayo enfríe el baño y los termómetros, desenergizando el baño, abriendo la llave de agua del intercambiador y colocando el agitador a su máxima velocidad.

### **5.2 PROCEDIMIENTO CON EL OHMETRO**

Ajuste la posición de la manija del multímetro SIGLENT SDM3055 correctamente para colocar el instrumento estable de tal manera que se pueda manipular y visualizar mejor la pantalla. Debe agarrar el mango por los lados y tirar de él hacia

afuera, luego gire el mango a la posición apropiada. Como se ilustra en las siguientes figuras:

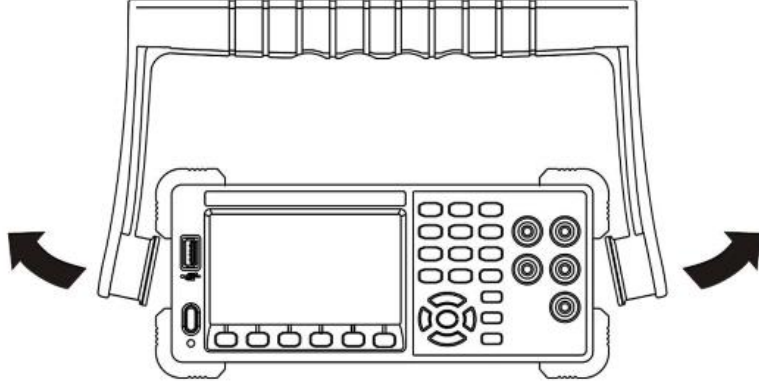


Figura 1. Ajuste del Mango

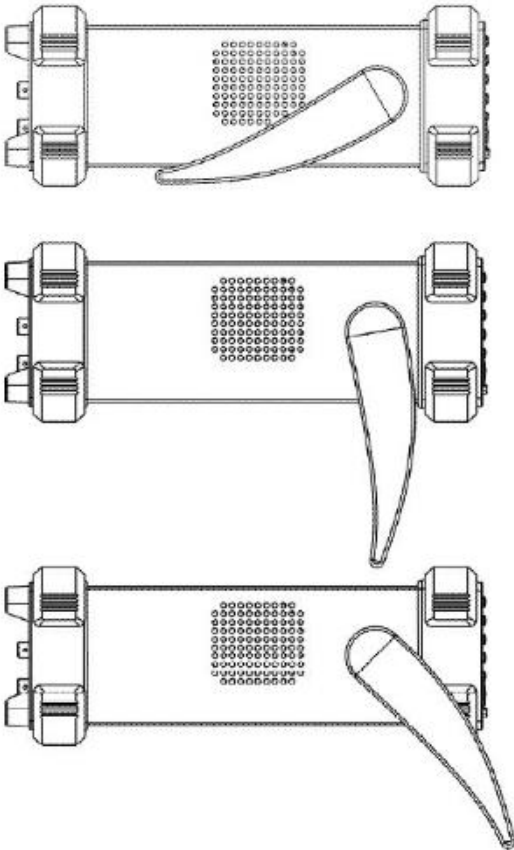


Figura 2. Posición Horizontal

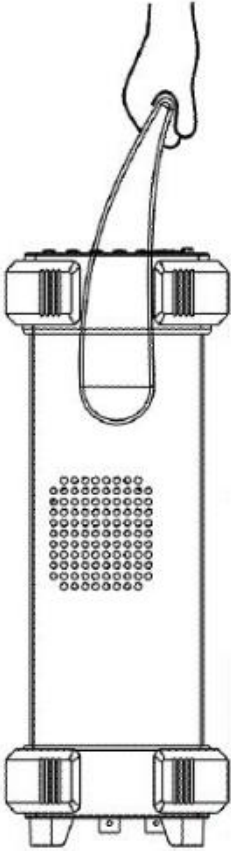



Figura 3. Posición de Transporte

Encienda el instrumento con los siguientes pasos:

- Ajuste el selector de voltaje a 110 en el panel posterior.
- Conecte el instrumento al suministro AC a través del cable de alimentación.
- El indicador de encendido brillara lentamente.
- Presione la tecla de encendido en el panel frontal, el instrumento se iniciará unos segundos más tarde.

Para medir la resistencia a la Pt-100 a 2 hilos los pasos de operación son:

1. Presionar  en el panel frontal para ingresar a la interfaz de medición de resistencia de 2 hilos, como se muestra en la figura 4:

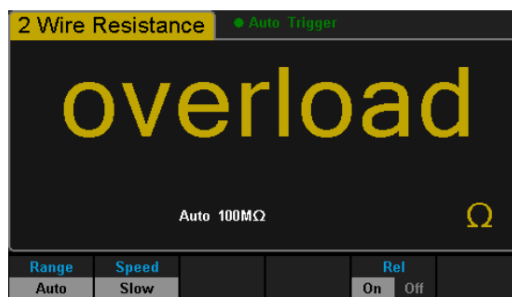


Figura4. Interfaz de medición de resistencia a 2- hilos

2. Conecte el cable rojo a la terminal de entrada HI y el cable negro a la terminal de entrada LO como muestra la figura 5:

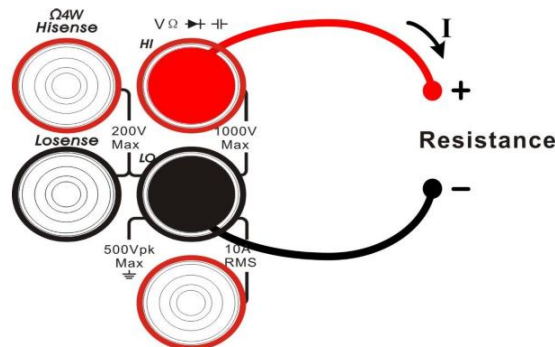


Figura 5. Bosquejo para medir resistencia a 2-hilos

Luego conecte uno de los cables de la Pt-100 a la terminal positiva (+) y el otro a la terminal negativa (-).

3. Configure el rango de resistencia como auto y presione **【Rel】** en la configuración off para cerrar la función de matemáticas relativas.

4. Seleccione la velocidad de medida al presionar **【Speed】** y seleccionando Slow para leer el resultado de la medida de resistencia de la Pt-100.

### 5.3 COMPROBACIÓN

Se realizan las siguientes operaciones:

Se inicia instalando la PT-100 y el termómetro patrón en la tapa del baño térmico. Se debe tener cuidado con la inmersión del bulbo o con la sonda de los termómetros para que no vayan a tener contacto con la hélice del agitador del baño térmico.

Cuando se instalen y desinstalen los termómetros, estos no deben someterse a choques térmicos grandes, por tanto para temperaturas altas se deben precalentar desde temperatura ambiente hasta la temperatura deseada y viceversa.

La profundidad de inmersión del termómetro para que logre la temperatura del baño es de 10 a 15 veces el diámetro del termómetro más la longitud del sensor,

Para alcanzar un valor estable en la temperatura encienda el agitador aplicando una presión entre 10 psi y 15 psi, medida en el manómetro de la unidad de mantenimiento.

Posteriormente energice el baño e indique al controlador mediante el set point (SV) el valor de temperatura del punto a comprobar, este procedimiento se detalla en los siguientes pasos:

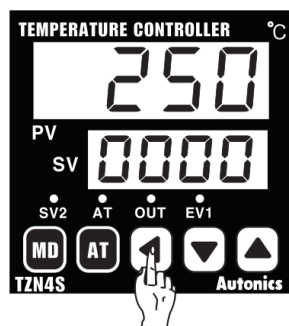


Figura 6.

1. En caso de cambiar el valor de ajuste en el estado, ajuste el botón

El 10° dígito parpadea en SV.



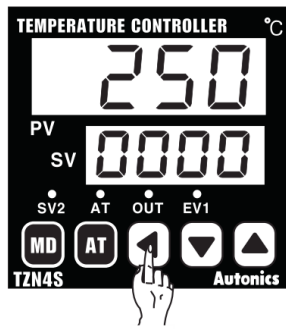



Figura 7.

2. Presione el botón , el dígito que parpadea cambiará paso a paso.

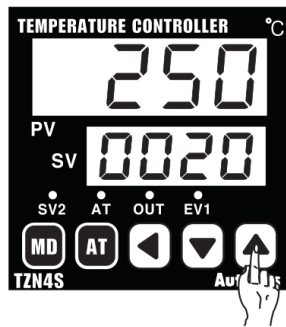
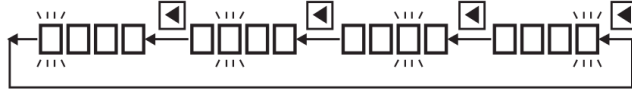


Figura 8.

3. Presione los botones  ó  al par padear el dígito, y entonces cambie el valor de ajuste.

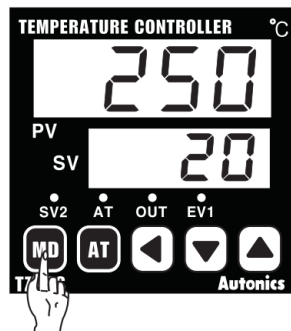



Figura 9.

4. Presione el botón  cuando el ajuste este completo. El parpadeo se detendrá, entonces regrese al modo RUN.

La escala de temperatura de trabajo es la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) medida en grados Celsius, escala con la cual la Pt-100 será calibrada.

Las lecturas deben ser tomadas cuando la temperatura mostrada en el display sea estable y alcance el valor del set point (SV). Si la temperatura no se estabiliza, realice un ajuste del controlador mediante la función autotuning, para ello coloque el set point (SV) a 80 °C y presione la tecla AT del controlador durante tres (3) segundos hasta que su indicador se encienda, el ajuste finaliza cuando este indicador se apaga totalmente.

**5.3.1 Toma de datos.** Se registran los datos desde 60°C a 165°C, con intervalos de 5°C en la tabla de interpolación la cual determina el valor de resistencia  $R_0$  de la Pt-100 a 0°C en la **Tabla de interpolación para Pt-100.**

Los puntos de comprobación se toman de acuerdo con el rango de trabajo del equipo y se muestran en el ANEXO 1 y deben ser digitados en el **FR-GM-19 Protocolo de comprobación para termómetros Pt-100.**

Con la ayuda del controlador, fije los puntos de comprobación en el termómetro patrón corrigiéndola de acuerdo con su certificado de calibración vigente de manera ascendente, y registre la resistencia dada por el multímetro patrón conectado a la Pt-100 a comprobar para cada punto. Se asume que tanto el termómetro a calibrar como el patrón se hallan, al momento de medir, en equilibrio térmico con el fluido del baño.

El punto máximo solo se toma como una medida ascendente, asegurándose que éste no supere la temperatura máxima permitida por el Patrón, de lo contrario modifique este punto al valor máximo posible.

Una vez tomado el punto máximo, evalúe los puntos anteriores de manera descendente en forma progresiva para comprobar la histéresis del equipo.

Para evitar introducir errores sistemáticos en la medición, se tendrá en cuenta la resistencia que aportan los hilos conductores, según su longitud, diámetro y resistividad del material en el termómetro a calibrar (Pt-100).

El resultado de la comprobación se obtienen según el ANEXO 2 donde el error de linealidad más o menos ( $\pm$ ) la incertidumbre, no debe ser mayor a  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  para que el equipo apruebe (PASA) la comprobación.

Si la Pt-100 NO PASA, realice un ajuste mecánico si este lo permite, respecto del termómetro patrón en el punto de comprobación donde se tuvo el mayor error. Posteriormente realice el procedimiento desde el punto 5.1.

Si la comprobación se realizó a un equipo crítico, se debe incluir una Tabla de Corrección como se indica en el ANEXO 3, que corresponde a la compensación por error sistemático que se hace a la indicación del instrumento, de tal forma que la temperatura correcta es la indicación del instrumento más la corrección. Además se debe calcular la incertidumbre de acuerdo con el **PR-GM-20 Cáculo de Incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición críticos** y se debe diligenciar el formato **FR-GM-20 Estado de los equipos de seguimiento y medición críticos.**

Si el termómetro NO PASA, informe inmediatamente a la Gerencia de Mantenimiento para establecer qué hacer con él. El resultado de la comprobación

con sus fechas, debe ser registrado en el **FR-GM-14 Hoja de vida de metrología** correspondiente.

## 7. ANEXOS

### ANEXO1. PUNTOS DE COMPROBACION DE Pt-100

| Área/Maquina            | Puntos de Comprobación °C |
|-------------------------|---------------------------|
| Prensa No 8             | 0,141,146,151             |
| Prensa Eléctrica de 48" | 0,141,146,151             |

### ANEXO 2. CALCULO DEL ERROR DE LINEALIDAD

El error en cada punto de comprobación se calculara mediante la siguiente expresión:

$$E = \text{Promedio del Equipo} - \text{Medida del Patrón}$$

### ANEXO 3. CORRECCION DE TEMPERATURA

La corrección de temperatura (°C) en cada punto comprobado se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Corrección} = \text{Medida del Patrón} - \text{Promedio del Equipo}$$

De manera que la temperatura correcta será:

$$T = \text{Medida del Equipo} + \text{Corrección}$$

## **ANEXO B. Procedimiento de comprobación para el transmisor de presión**

### **1. OBJETIVO**

En este procedimiento tiene como objeto describir la sistemática para realizar la comprobación del transmisor de presión con salida eléctrica de **Icobandas s.a.**, asegurando que el instrumento cumpla con los límites de error aceptados por la empresa.

### **2. ALCANCE**

Aplica para los transmisores de presión de 2 hilos y salida lineal cuyos rangos no excedan los 5000 psi, con clase de exactitud menor a 0,5 % y salida lineal con la presión en intensidad de corriente usado en la empresa, mediante el método de comparación con el manómetro patrón además de un multímetro para medir la salida.

### **3. DEFINICIONES**

**Banco comparado de Manómetros.** Dispositivo en el que se instalan dos (2) Manómetros y que permite regular presión hidráulica estable, para analizar el comportamiento de los equipos por comparación.

**Manómetro Patrón.** Manómetro certificado por un organismo acreditado que garantice la trazabilidad de la medida.

**Transmisor de Presión.** Elemento que capta la variable de presión y la convierte en una señal capaz de ser transmitida. Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20mA c.c., al ser continua elimina la posibilidad de adquirir perturbaciones y está libre de corrientes parasitas.

**Rango.** Es el intervalo de trabajo entre el máximo valor y el mínimo reportado en la caratula del manómetro.

### **4. CONDICIONES GENERALES**

#### **4.1 Elementos necesarios para la comprobación**

- Banco comparador de Manómetros.
- Manómetro digital patrón con rango de 0 psi a 5000 psi y división de escala de 0,1 psi.
- Transmisor de presión.
- Multímetro patrón de precisión.
- Paños para la limpieza.



## **4.2 OPERACIONES PRELIMINARES**

**4.2.1 Condiciones generales.** Asegúrese que en el laboratorio se cumplan las condiciones descritas en el documento **IN-GM-21 Instructivo para realizar comprobaciones internas.**

**4.2.2 Limpieza.** Antes de proceder con la comprobación del transmisor de presión se someterá a una operación de limpieza que elimine toda la suciedad, para ello se deberá limpiar el transmisor de presión con un algodón mojado en disolvente, luego secarlo con una bayetilla, lanilla o dulce abrigo blanco.

Se debe tener especial cuidado con la limpieza del orificio de entrada del aceite al manómetro pues si contiene alguna suciedad, puede llegar a contaminar el Banco de comparación y dañar alguno de sus componentes.

**4.2.3 Inspección visual.** Se realizara una inspección visual sobre el estado del instrumento, para comprobar su buen estado, sin la presencia de defectos, deformaciones, malos contactos, cables de conexión rotos, dificultad para leer las marcas, entre otros.

Si el instrumento presenta manchas profundas de óxido o alguno de los defectos anteriormente mencionados entonces NO PASA y debe ser reemplazado por uno en buen estado el cual se le debe realizar el presente procedimiento.

**4.2.4 Estabilización de los instrumentos.** Se corrobora que la instrumentación involucrada en la medición se halle en estado operativo, respetando luego de su encendido, un intervalo de estabilización de al menos 10 minutos.

## **5. DESARROLLO**

La comparación se realiza comparando la lectura entregada por el transmisor de presión a comprobar con el valor de presión dado por el manómetro patrón.

### **5.1 CONEXIONES**

Conecte el transmisor de presión a comprobar (conexión derecha) y el manómetro patrón en las conexiones del banco comparador, escogiendo el adaptador adecuado. Tenga en cuenta que el hilo interno del roscado de la mitad inferior del adaptador, es izquierdo.

Inicialmente ajuste el adaptador al banco comparador de manómetro, luego instale el manómetro en el adaptador correspondiente atornillándolo en el sentido antihorario, sosteniendo el adaptador con la mano.

Ajuste el transmisor de presión y el manómetro patrón sosteniéndolos firmemente, mientras gira el adaptador en sentido antihorario hasta obtener un buen sellado, un ajuste manual es más que suficiente.

## 5.2 LLENADO

Se realizan las siguientes operaciones, para realizar el llenado del aceite en el Banco comparador de Manómetros.

- A. Atornille el timón completamente.
- B. levante y gire 180° la cubierta del tanque.
- C. Llene el tanque con el aceite a  $\frac{3}{4}$  de su máxima capacidad y cierre la cubierta.
- D. cierre la válvula del tanque.
- E. Destornille completamente el timón y luego, abra la válvula del tanque.
- F. Mantenga abierta la válvula del tanque y atornille el timón.
- G. Repita los pasos de D a F hasta que dejen de aparecer burbujas en el tanque.
- H. Abra la válvula del tanque y destornille completamente el timón.
- I. Cierre la válvula del tanque.

## 5.3 PROCEDIMIENTO CON EL AMPERIMETRO

Ajuste la posición de la manija del multímetro SIGLENT SDM3055 correctamente para colocar el instrumento estable de tal manera que se pueda manipular y visualizar mejor la pantalla. Debe agarrar el mango por los lados y tirar de él hacia afuera, luego gire el mango a la posición apropiada. Como se ilustra en las siguientes figuras:

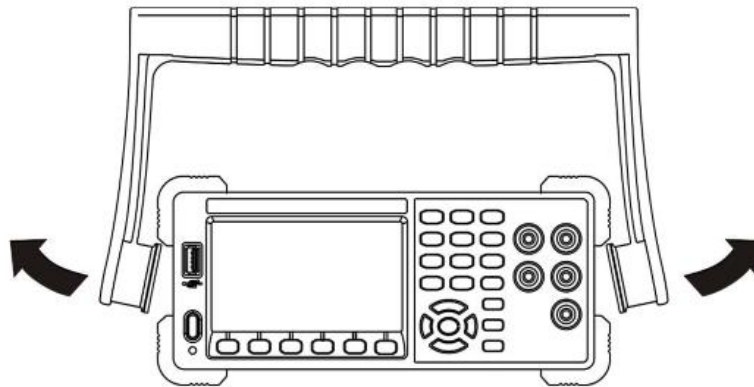


Figura 1. Ajuste del Mango

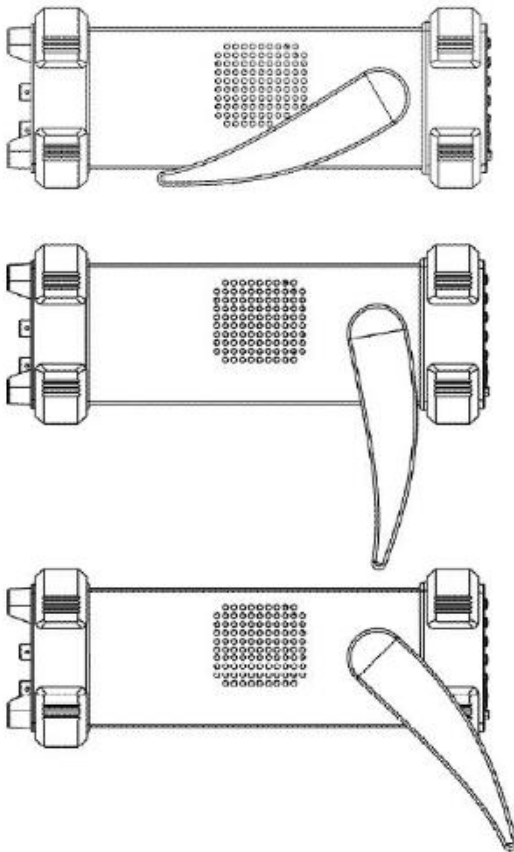


Figura 2. Posición Horizontal

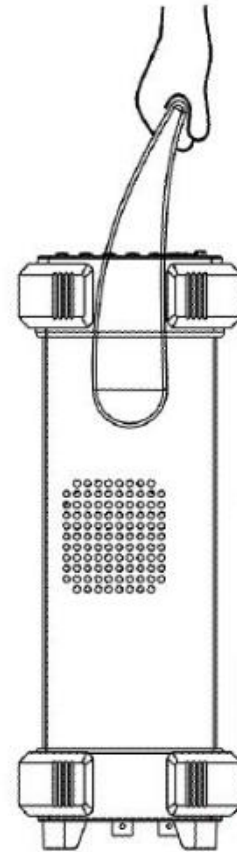




Figura 3. Posición de Transporte

Encienda el instrumento con los siguientes pasos:

- Ajuste el selector de voltaje a 110 en el panel posterior.
- Conecte el instrumento al suministro AC a través del cable de alimentación.
- El indicador de encendido brillara lentamente.
- Presione la tecla de encendido en el panel frontal, el instrumento se iniciará unos segundos más tarde.

El multímetro permite medir corriente DC hasta 10A. El método para conectar y medir la corriente DC que pasa por el transmisor de presión se presentará en detalles con los siguientes pasos:

1. Presione  y  en el panel frontal para ingresar a la interfaz de medición de corriente DC como se muestra en la figura 4:

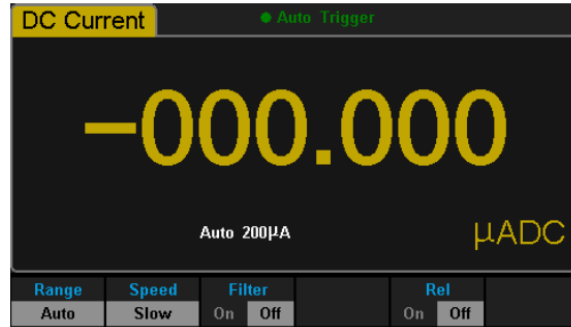


Figura4. Interfaz de medición de corriente DC.

2. Conecte el cable rojo a la terminal de entrada I y el cable negro a la terminal de entrada LO como muestra la figura 5:

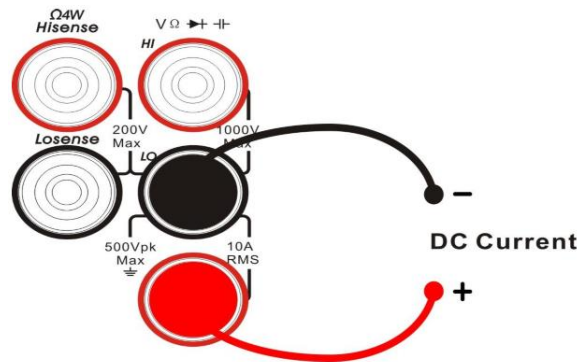


Figura 5. Bosquejo para medir corriente DC

3. Conecte el transmisor de presión al amperímetro y a la fuente de voltaje de 8...33 VDC como lo indica la siguiente figura:

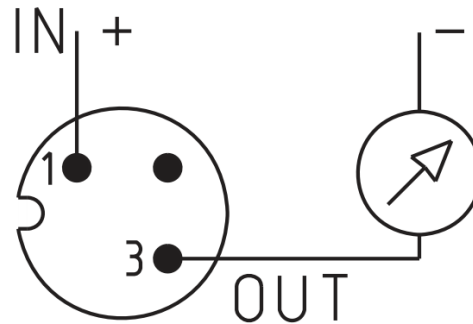


Figura 6. Conexión eléctrica del transmisor de presión a 2-hilos

4. Configure el rango de corriente como auto y presione **【Rel】** en la configuración off para cerrar la función de matemáticas relativas.

5. Seleccione la velocidad de medida al presionar **【Speed】** y seleccionando Slow para leer el resultado de la medida de corriente del transmisor de presión.

## 5.4 COMPROBACIÓN

Para realizar la comprobación, las condiciones ambientales deben de mantenerse estables.

Atornille el timón para incrementar la presión en el sistema, y desatornille el timón para decrementarla.

Antes de realizar la comprobación, lleve el Manómetro patrón y el transmisor de Presión a la presión máxima que se puede alcanzar sin exceder la capacidad de los mismos, luego vuelva a cero (0). Realice este procedimiento en tres (3) oportunidades.

**5.4.1 Toma de datos.** El primer punto de comprobación es el valor mínimo que se puede identificar en el manómetro, los demás puntos se toman de acuerdo al ANEXO 1, deben ser digitados en el **FR-GM-31 Protocolo de comprobación para transmisores de presión** en las columnas “Lectura Ascenso” y “Lectura Descenso”, según corresponda.

Aplique presión ascendente en forma progresiva, evaluando los puntos indicados hasta que el patrón de presión dé la lectura deseada en forma estable. Para esto fije cada punto en el Manómetro patrón hasta que el equipo dé una señal que se traduzca en una lectura estable y registre la medida de corriente indicada por el transmisor de presión a comprobar mediante el multímetro patrón.

El punto máximo solo se toma como una medida ascendente, asegurándose que éste no supere la presión máxima permitida por el Patrón, de lo contrario modifique este punto al valor máximo posible.

Una vez tomado el punto máximo, evalúe los puntos anteriores aplicando presión descendente en forma progresiva para comprobar la histéresis del equipo. Al terminar reduzca SIEMPRE la presión del sistema destornillando completamente el timón, NUNCA abre la válvula del tanque para reducir la presión.

El resultado de la comprobación se obtiene utilizando los ANEXOS 1, 2, 3, 4, y 5 donde el porcentaje de error de linealidad no debe ser mayor a la clase del transmisor de presión a comprobar indicada en el ANEXO 6, de lo contrario el equipo NO PASA.

En cualquier caso, si la tolerancia en la medición establecida para el transmisor de presión es bilateral, el porcentaje de error de linealidad y el porcentaje de error de histéresis obtenidos, no deben exceder el error máximo permitido para la clase indicada según el ANEXO 6, de lo contrario se establece que el transmisor de presión NO PASA.

Si dicha tolerancia es unilateral positiva, el porcentaje de error de linealidad y el porcentaje de error de histéresis obtenidos, solo pueden tomar valores negativos

permitidos para la clase indicada según el ANEXO 6, de lo contrario se establece que el transmisor de presión NO PASA.

Si el transmisor de presión NO PASA, realice un ajuste mecánico si este lo permite, respecto de la indicación del patrón donde se tuvo el mayor error. Posteriormente realice el procedimiento desde el punto 5.1.

Si la comprobación se realizó a un equipo crítico, se calcula la incertidumbre de acuerdo con el **PR-GM-20 Cáculo de Incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición críticos** y se debe diligenciar el formato **FR-GM-20 Estado de los equipos de seguimiento y medición críticos**.

En los dos casos, si el equipo NO PASA, informe inmediatamente a la Gerencia de Mantenimiento para establecer qué hacer con él. El resultado de la comprobación con sus fechas, debe ser registrado en el **FR-GM-14 Hoja de vida de metrología** correspondiente.

## 6. DOCUMENTOS REFERENCIADOS

- IN-GM-21** Instructivo para realizar comprobaciones internas.
- FR-GM-14** Hoja de vida de metrología.
- FR-GM-31** Protocolo de comprobación para el Transmisor de Presión.
- FR-GM-20** Estado de los equipos de seguimiento y medición críticos.
- PR-GM-20** Cálculo de incertidumbre para los equipos de seguimiento y medición críticos.

## 7. ANEXOS

### ANEXO 1. CLASE Y CANTIDAD DE PUNTOS DE COMPROBACIÓN

| Clase | Puntos de comprobación (psi) |
|-------|------------------------------|
| 0,5   | 600, 800, 1000, 1200 y 1400  |

### ANEXO 2. CALCULO DEL ERROR DE LINEALIDAD

El error en cada punto de comprobación se calculara mediante la siguiente expresión:

$$E = \text{Promedio del Equipo} - \text{Medida del Patrón}$$

### ANEXO 3. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR DE LINEALIDAD

Con el valor absoluto del máximo error de linealidad ( $E_{\max}$ ) encontrado, se calcula el porcentaje de error de linealidad, obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$\% = \left( \frac{E_{max}}{Rango} \right) \times 100$$

#### ANEXO 4. CÁLCULO DE LA HISTÉRESIS

La histéresis para un punto de comprobación corresponde al producto de  $\frac{r_{TP}}{L_E - l_E}$  entre el valor absoluto de la diferencia del valor medio de corriente para ese punto de manera ascendente y el valor medio descendientemente. La histéresis se calcula para todos los puntos de comprobación de acuerdo con la siguiente expresión:

$$his = \frac{r_{TP}}{L_E - l_E} \cdot |\bar{I}_{Baj} - \bar{I}_{Sub}|$$

Donde,

$r_{TP}$ : Rango de medida del instrumento en unidades de presión

$L_E$ : Mayor valor del rango eléctrico.

$l_E$ : Menor valor del rango eléctrico.

#### ANEXO 5. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR DE HISTÉRESIS

Con el máximo valor de histéresis ( $his_{máx}$ ) encontrado en la comprobación, se calcula el porcentaje de error de histéresis mediante la siguiente ecuación:

$$\% = \left( \frac{his_{max}}{Rango} \right) \times 100$$


#### ANEXO 6. ERROR DE LINEALIDAD MÁXIMO PERMITIDO PARA TRANSMISOR DE PRESIÓN.

| CLASE DE EXACTITUD | LÍMITES DE ERROR PERMITIDOS |
|--------------------|-----------------------------|
| 0,5                | ± 0,5%                      |





# ANEXO D. Protocolo de comprobación para transmisor de presión.



**icobanegas s.a.**  
soluciones integrales para manejo de materiales

**PROTOCOLO DE COMPROBACION PARA TRANSMISOR DE PRESION**

Página 2 DE 2

**Identificación:** \_\_\_\_\_

**rea / Máquina:** \_\_\_\_\_

**Protocolo de** \_\_\_\_\_

**Protocolo de** \_\_\_\_\_

**INSPECCIÓN VISUAL**

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Cilindro:                 |  |
| Golpes:                   |  |
| Conexión:                 |  |
| Rayaduras:                |  |
| Aspecto General:          |  |
| Dispositivo Bloqueo:      |  |
| Elemento de Medición:     |  |
| Legibilidad Graduaciones: |  |

**EJECUCIÓN**

| COMPROBACIÓN            |  | Año | Mes | Día | PROTOKOL O / HORA |
|-------------------------|--|-----|-----|-----|-------------------|
| Ultima                  |  |     |     |     |                   |
| Actual                  |  |     |     |     |                   |
| Próxima                 |  |     |     |     | ...               |
| Procedimiento Utilizado |  |     |     |     |                   |
| Equipos Utilizados      |  |     |     |     |                   |

**DATOS TÉCNICOS**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Unidad                |  |
| Rango del Equipo:     |  |
| División de Escala:   |  |
| Clase:                |  |
| Rango de Medida:      |  |
| Tolerancia de Medida: |  |

**CONDICIONES AMBIENTALES**

**Humedad Relativa (%)**  
mín: \_\_\_\_\_ máx: \_\_\_\_\_

**Temperatura (°C)**  
mín: \_\_\_\_\_ máx: \_\_\_\_\_

**RESULTADOS**

Error max permitido: \_\_\_\_\_

% Error linealidad: \_\_\_\_\_

% Error histéresis: \_\_\_\_\_

**Resultado final** \_\_\_\_\_

| MEDIDA PATRON | LECTURAS 1     |                | LECTURA 2      |                | INDICACION DE INSTRUMENTO | ERROR | HISTERESIS | Incertidumbre |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|-------|------------|---------------|
|               | ASCENDENTE     | DESCENDENTE    | ASCENDENTE     | DESCENDENTE    |                           |       |            |               |
|               | CORRIENTE (mA) | CORRIENTE (mA) | CORRIENTE (mA) | CORRIENTE (mA) |                           |       |            |               |
|               |                |                |                |                |                           |       |            |               |
|               |                |                |                |                |                           |       |            |               |
|               |                |                |                |                |                           |       |            |               |
|               |                |                |                |                |                           |       |            |               |
|               |                |                |                |                |                           |       |            |               |

**OBSERVACIONES**

---



---



---

**FIRMAS AUTORIZADAS**

REALIZÓ: \_\_\_\_\_

APROBÓ: \_\_\_\_\_

## ANEXO E. Carta de aval de la empresa Icobandas s.a.



Popayán, 28 de junio de 2019

ICODM-19-018

Señores:  
CONSEJO DE FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
Popayán, Cauca

Cordial Saludo:

Por medio de la presente nos permitimos informarle que el trabajo de grado titulado **Diseño e Implementación del procedimiento de Comprobación de los Medidores de presión y Temperatura en el Laboratorio de Metrología de Icobandas s. a.** realizado por los estudiantes del programa de Ingeniería Física, Natali Wbelly Orozco identificada con el No. de cedula 1.061.728.504 de Popayán y Elmer Alonso Pizo identificado con el No. de cedula 1.061.723.361 de Popayán. Ha sido avalado y la información suministrada en los documentos cumple con las políticas de la empresa.

Cordialmente,



HUMBERTO RUIZ-VICTORIA  
Gerente de Mantenimiento  
Icobandas S.A.

Copia: Corresp. Externa Enviada