



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN
DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTORES:

Jairo Israel Tigasi Licto
Kevin Alexander Siza Tigse

TUTOR:

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C.

LATACUNGA, AGOSTO, 2026

Latacunga, agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros Tigasi Licto Jairo Israel, Siza Tigse Kevin Alexander declaramos ser autores del proyecto de titulación “**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA**”, siendo el Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C. tutor del presente trabajo de titulación; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Tigasi Licto Jairo Israel
CC. 055024424-8

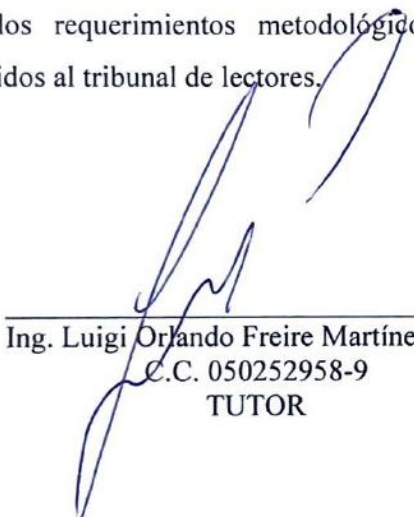


Siza Tigse Kevin Alexander
CC. 185101052-8

Latacunga, agosto 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA**”, propuesto por los estudiantes Tigasi Licto Jairo Israel y Siza Tigse Kevin Alexander de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C
C.C. 050252958-9
TUTOR

Latacunga, agosto 2026

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

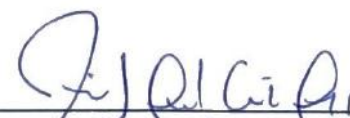
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título “**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA**”, propuesto por los estudiantes Tigasi Licto Jairo Israel y Siza Tigse Kevin Alexander de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, me permito indicar que los estudiantes han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad de Propuesta tecnológica, en virtud de lo cual los postulantes pueden presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,



Lector 1 (Presidente)
Ing. Albarracín Álvarez Mauro Dario Ms.C
CC: 0503113730

Lector 2
Ing. Gallardo Molina Cristian Fabián Ms.C
CC: 0502847692

Lector 3
Ing. Cruz Panchi Luis Rolando Ms.C
CC: 0502595176

Latacunga, agosto 2026

CERTIFICADO CONFORME DE SIMILITUD

En mi calidad como Tutor del Proyecto de Titulación con el Tema: “**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA**” de **Tigasi Licto Jairo Israel y Siza Tigse Kevin Alexander**, de la carrera de Ingeniería Electromecánica remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto **Turnitin** con un porcentaje de coincidencias del 7%; y expreso, una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

Kevin Alexander Siza Tigse Kevin Alexander Siza Ti...
KEVIN ALEXANDER SIZA TIGSE

Quick Submit
Quick Submit
Universidad Técnica De Cotacachi

Detalles del documento

Identificador de la entrega
enid:1362982512

65 páginas

Fecha de entrega
19 ago 2026, 8:57 a.m. GMT-5

16.883 palabras

98.780 caracteres

Fecha de descargo
19 ago 2026, 9:52 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tema: Protocolo HART Temperature.pdf

Tamaño del archivo

2.1 MB

turnitin Página 7 de 69. Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: enid:1362982512

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes sugeridas, para el

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 5 palabras)

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

Nº de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los alertas de integridad sistema analizan un documento en profundidad para
buscar coincidencias que permitan distinguir entre una entrega normal, la
adquisición de alguna fuente, la manipulación como una alerta para que pueda revisarse.
Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo,
recomendamos que revise alertas y la misma.

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C
C.C. 050252958-9
TUTOR

Latacunga, agosto del 2026

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés; **CERTIFICO** en forma legal que:

La traducción del resumen al idioma inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA”**, presentado por: **Siza Tigse Kevin Alexander** y **Tigasi Licto Jairo Israel**, egresados de la Carrera de: **Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciya**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Atentamente,



Lic. Deysi Paola Carrera Rivera

CI: 0503792533

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi Dios por haberme guiado a lo largo de todo este camino, por brindarme la capacidad de rendirme aun en los peores momentos.

A mi madre que día a día me ha apoyado y brindado su cariño cuando sentía que ya no podía más, nunca dejo de alentarme.

Expreso mis agradecimientos a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a los docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica, quienes me han acompañado y brindado sus conocimientos, contribuyendo a mi formación académica.

De especial manera, agradezco a mi tutor de tesis por su guía, apoyo y recomendaciones durante el desarrollo del presente proyecto de titulación, donde sus observaciones e indicaciones fueron fundamentales para la culminación del trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y finalización del presente trabajo.

Jairo Tigasi

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto investigativo, en primer lugar, a Dios por brindarme salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia, a él le agradezco por cada oportunidad, por cada aprendizaje y permitirme culminar una etapa tan importante en mi vida.

A mis padres, por ser uno de los pilares fundamentales en mi formación y en mi vida, por cada sacrificio realizado, por sus consejos, por su apoyo y por confiar en mí incluso en aquellos momentos donde todo parecía dificultarse. Este logro también les pertenece, porque detrás de cada paso que daba ellos estaban ahí animándome a salir adelante.

También dedico este trabajo a todas aquellas personas que formaron parte de mi vida universitaria y que de una u otra forma me dejaron grandes enseñanzas.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo por no haberme rendido en ningún momento, por cada noche de estudio, cada dificultad superada y por cada error del que supe aprender. Llegar aquí representa los años de esfuerzo en los que decidí no rendirme y seguir adelante.

Jairo Tigasi

AGRADECIMIENTO

Expreso un agradecimiento profundo a la Universidad Técnica de Cotopaxi por haberme acogido durante todos estos años, brindarme la formación académica y los conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional.

De manera especial, agradezco a los docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

Un reconocimiento especial a mi tutor de tesis, por su orientación, acompañamiento y valioso aporte durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, cuya guía fue fundamental para el cumplimiento de los objetivos planteados y la culminación exitosa de esta etapa académica

A mi familia, por ser mi red de seguridad y mi mayor fuente de motivación, por enseñarme que el esfuerzo siempre tiene recompensa. Y a todos aquellos que creyeron en mí, incluso cuando yo dudaba.

Kevin Siza

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, porque Su mano ha estado presente en cada página escrita, en cada desvelo superado y en cada obstáculo vencido el me dio la salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi familia, el tesoro más valioso que Dios me ha dado, por su esfuerzo incansable para brindarme lo mejor, quienes han sido el pilar fundamental en los momentos más difíciles y la que motivación constante para no rendirme.

De manera muy especial, dedico este logro a mi hijo mi mayor inspiración y razón para superarme cada día. Su amor, paciencia y alegría me impulsó a seguir adelante y a demostrarles que con esfuerzo, disciplina y fe es posible alcanzar los sueños.

Kevin Siza

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE TEMPERATURA”

Autores:

Tigasi Licto Jairo Israel

Siza Tigse Kevin Alexander

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo aplicar un procedimiento técnico mediante protocolo HART en la calibración de un transmisor de temperatura, con el propósito de identificar la etapa que requería intervención, aplicar el ajuste disponible y evaluar cuantitativamente el error de la variable primaria. El problema se centra en que una verificación basada únicamente en la señal de 4–20 mA no permitiría conocer con claridad el origen del error de medición, por lo que se utilizó la comunicación HART para acceder a la información interna del transmisor y complementar la evaluación. El trabajo se desarrolló mediante un método experimental en un rango de 0 a 100 °C, utilizando un potenciómetro de precisión como simulador resistivo de una Pt100, con valores equivalentes obtenidos mediante la relación resistencia–temperatura establecida en la IEC 60751. Se evaluaron cinco puntos correspondientes al 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del rango de 0 a 100 °C, registrando la temperatura de referencia, la variable primaria PV y la salida analógica con un comunicador HART 475 OEM; el error de PV se calculó como la diferencia entre el valor medido y la referencia, conforme al JCGM 200:2012. Antes del ajuste Zero PV, los errores fueron +0.14 °C, +0.14 °C, +0.26 °C, +0.29 °C y +0.21 °C. Después del ajuste, disminuyeron a +0.02 °C, +0.01 °C, +0.02 °C, +0.01 °C y +0.02 °C, respectivamente, y se mantuvieron dentro del límite de ± 0.1 % del fondo de escala indicado para el transmisor. Como aporte se inicia un procedimiento de verificación, diagnóstico, ajuste y comprobación posterior mediante HART, que podía emplearse como guía en prácticas de instrumentación. Se concluyó que el protocolo HART permitió realizar una intervención técnica sustentada en la comparación de la PV con su referencia y comprobar cuantitativamente la reducción del error después del ajuste.

Palabras clave: protocolo HART, transmisor de temperatura, Pt100, calibración, Zero PV, error de medición.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**THEME: “APPLICATION OF THE HART PROTOCOL IN THE CALIBRATION
PROCESS FOR TEMPERATURE TRANSMITTERS”**

Authors:

Tigasi Licto Jairo Israel
Siza Tigse Kevin Alexander

ABSTRACT

The objective of this research was to apply a technical procedure using the HART protocol for the calibration of a temperature transmitter in order to identify the stage requiring intervention, apply the available adjustment, and quantitatively evaluate the error in the primary variable. The problem addressed was that verification based solely on the 4–20 mA signal did not clearly identify the source of the measurement error. Therefore, HART communication was used to access the transmitter’s internal information and complement the evaluation. The study was conducted experimentally over a range of 0 to 100 °C, using a precision potentiometer as a resistive simulator of a Pt100 sensor. The equivalent resistance values were determined from the resistance–temperature relationship established in IEC 60751. Five points corresponding to 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of the range were evaluated. The reference temperature, Primary Variable (PV), and analog output were recorded using a HART 475 OEM communicator, and the PV error was calculated as the difference between the measured value and the reference value, in accordance with JCGM 200:2012. Before the Zero PV adjustment, the errors were +0.14 °C, +0.14 °C, +0.26 °C, +0.29 °C, and +0.21 °C. After the adjustment, they decreased to +0.02 °C, +0.01 °C, +0.02 °C, +0.01 °C, and +0.02 °C, respectively, and remained within the $\pm 0.1\%$ full-scale limit specified for the transmitter. As a contribution, a procedure for verification, diagnosis, adjustment, and post-adjustment verification using HART was established, which could be used as a guide for instrumentation laboratory practices. It was concluded that the HART protocol enabled a technical intervention based on the comparison between the PV and its reference value and allowed the reduction in measurement error after the adjustment to be quantitatively verified.

Keywords: HART protocol, temperature transmitter, Pt100, calibration, Zero PV, measurement error.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES	iv
CERTIFICADO DE INFORME DE SIMILITUD.....	v
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO.....	ix
DEDICATORIA	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	4
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	5
2.3.1. Objeto de investigación	5
2.3.2. Campo de acción	5
2.4. BENEFICIARIOS	5
2.4.1. Directo	5
2.4.2. Indirecto.....	5
2.5. JUSTIFICACIÓN	5
2.6. OBJETIVOS	6
2.6.1. General.....	6
2.6.2. Específicos.....	6

2.7.	SISTEMA DE TAREAS	7
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
3.1.	ANTECEDENTES	8
3.2.	INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA	10
3.2.1.	Temperatura como variable de proceso.....	11
3.2.2.	Sensores industriales de temperatura.....	11
3.3.	TRANSMISORES INTELIGENTES DE TEMPERATURA	12
3.3.1.	Principio de funcionamiento de un transmisor inteligente	13
3.3.2.	Conversión analógico-digital.....	14
3.3.3.	Procesamiento digital	15
3.3.4.	Conversión digital-analógica.....	16
3.4.	SEÑAL NORMALIZADA DE 4-20 mA	17
3.4.1.	Valor del rango inferior y valor del rango superior.....	17
3.4.2.	Relación temperatura corriente.....	18
3.5.	FUNDAMENTOS METROLÓGICOS PARA LA CALIBRACIÓN.....	19
3.5.1.	Calibración	19
3.5.2.	Ajuste.....	19
3.5.3.	Error absoluto	20
3.5.4.	Exactitud, tolerancia y criterio de aceptación.....	21
3.6.	PROTOCOLO HART.....	22
3.6.1.	Principio de funcionamiento del protocolo HART.....	23
3.6.2.	Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)	23
3.6.3.	Arquitectura de comunicación HART	24
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	26
4.1.	VARIABLES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	27
4.2.	RESISTENCIAS EQUIVALENTES A LA Pt100.....	28
4.2.1.	Selección de los cinco puntos de calibración y verificación.	30

4.2.2.	Cálculo de la corriente teórica	30
4.3.	DISEÑO Y CONEXIÓN DEL CIRCUITO EXPERIMENTAL.....	31
4.4.	PREPARACIÓN DEL SIMULADOR RESISTIVO.....	32
4.4.1.	Verificaciones previas mediante el comunicador HART 475 OEM	33
4.5.	INSTRUCCIONES DE NAVEGACIÓN COMUNICADOR HART	34
4.5.1.	Guía de uso del comunicador HART 475 OEM.....	34
4.6.	PRIMERA VERIFICACIÓN ANTES DEL AJUSTE	38
4.6.1.	Cálculo del error de medición en PV.....	39
4.7.	EJECUCIÓN DEL AJUSTE ZERO PV	39
4.7.1.	Cálculos posteriores al ajuste del Zero PV	40
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
5.1.	DETERMINACIÓN DE VALORES TEÓRICOS.....	40
5.1.1.	Valores de resistencia	40
5.1.2.	Cálculo de la corriente teórica	41
5.2.	PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	42
5.3.	DATOS ANTES DEL AJUSTE DE ZERO PV	43
5.3.1.	Cálculo de temperatura equivalente a la resistencia real antes del ajuste	43
5.3.2.	Error en PV antes del ajuste	44
5.4.	DATOS DESPUÉS DEL AJUSTE DE ZERO PV.....	45
5.4.1.	Cálculo de temperatura equivalente a la resistencia real después del ajuste	45
5.4.2.	Error en PV después del ajuste	46
5.5.	GRÁFICA DE RESPUESTA DE PV ANTES Y DESPUÉS DEL AJUSTE	47
5.5.1.	Gráfica del error de PV antes y después de Zero PV	49
5.6.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	50
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
6.1.	CONCLUSIONES	51
6.2.	RECOMENDACIONES.....	52

7. BIBLIOGRAFÍA.....	53
----------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Curvas de tensión termoeléctrica en función de la temperatura para diferentes tipos de termopares [25].	12
Figura 3.2. Diagrama de bloques de un sistema de medición con transmisor inteligente de temperatura [29].	13
Figura 3.3. Etapas internas de procesamiento de un transmisor inteligente de temperatura [30].	14
Figura 3.4. Comparación entre la curva estándar y la curva real de un sensor RTD [29].	16
Figura 3.5. Regla de decisión por aceptación simple respecto a un límite de tolerancia [31].	22
Figura 3.6. Superposición de la señal digital HART sobre la señal analógica mediante modulación FSK [34].	24
Figura 3.7. Arquitectura de conexión de un transmisor con comunicación HART y lazo de 4–20 mA [29].	25
Figura 4.1. Cableado del montaje experimental.	32
Figura 4.2. Pantalla del comunicador HART 475 OEM durante la detección del transmisor.	33
Figura 4.3. Función de los teclados del comunicador HART 475 OEM.	34
Figura 5.1. Comparación de la respuesta PV antes del ajuste Zero PV.	48
Figura 5.2. Comparación de la respuesta PV después del ajuste Zero PV.	48
Figura 5.3. Error de PV antes y después del ajuste Zero PV.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].	2
Tabla 2.1.1 Sistema de tareas.	7
Tabla 5.1. Valores nominales de $R(\Omega)$ y $I(\text{mA})$	42
Tabla 5.2. Resultados experimentales antes del ajuste Zero PV.	45
Tabla 5.3. Resultados experimentales después del ajuste Zero PV.....	47
Tabla 5.4. Datos de PV antes y después del ajuste.....	48
Tabla 5.5. Error de PV antes y después del ajuste.....	49

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Aplicación del protocolo HART en el proceso de calibración de transmisores de temperatura.

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	X
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Trabajo de titulación vinculado al proyecto: No aplica

Equipo de Trabajo:

Tigasi Licto Jairo Israel

Siza Tigse Kevin Alexander

Ing. Freire Martínez Luigi Orlando Ms.C.

Área de Conocimiento: El presente proyecto de investigación se trabajó en el área 3311 que corresponde a Tecnologías de la Instrumentación; con el campo 3311.01 Tecnologías de la Automatización y finalmente con el campo detallado en 3311.05 de equipos eléctricos de control y 3311.06 Instrumentos Eléctricos, como se puede apreciar en la Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

3311 Tecnologías de la Instrumentación	3311.01 Tecnología de la Automatización
	3311.05 Equipos Eléctricos de Control
	3311.06 Instrumentos Eléctricos
	3311.16 Instrumentos de Medida de la Temperatura

Línea de investigación: Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Automatización e inteligencia artificial aplicada a sistemas electromecánicos.

2. INTRODUCCIÓN

La instrumentación industrial permite supervisar y controlar procesos mediante la medición de variables físicas como precisión, nivel, caudal y temperatura, donde esta última tiene especial relevancia en procesos térmicos, químicos y de manufactura, debido que si hay errores en su medición pueden afectar la operación del sistema, por lo que se requieren instrumentos con estabilidad y precisión adecuadas [2], [3].

La medición de temperatura emplea sensores como termistores, termopares y detectores resistivos, los cuales forman parte de una cadena de medición donde intervienen etapas de acondicionamiento, conversión y transmisión. El desempeño del sistema depende tanto del sensor como de los circuitos electrónicos asociados, debido a factores como la no linealidad, variaciones de componentes y errores de procesamiento [4], [5].

El desarrollo de la electrónica digital permitió la creación de transmisores inteligentes que son capaces de procesar señales, almacenar parámetros y proporcionar información adicional del instrumento, sin embargo, estas funciones no eliminan las desviaciones producidas por las características del sensor, condiciones ambientales o envejecimiento de componentes, por lo que la calibración periódica continúa siendo necesaria [5], [6].

La calibración permite determinar la relación entre la medición del instrumento y un patrón de referencia, siendo necesario controlar condiciones como estabilidad y uniformidad térmica para reducir errores. Orzylowski y sus colaboradores señalaron la importancia de utilizar sistemas de comparación en condiciones controladas para la calibración automática de sensores de

temperatura [6]. Asimismo, Pertijs y sus colaboradores evidenciaron que las técnicas de calibración aplicadas a sensores inteligentes permiten reducir errores y mejorar su comportamiento metrológico [7], [8]. De forma similar, Aita y sus colaboradores desarrollaron un sensor inteligente de temperatura en el cual la aplicación de procedimientos de calibración permitió reducir la inexactitud de las mediciones en un amplio intervalo de temperatura [9].

En los sistemas industriales tradicionales, la transmisión de variables de proceso se ha realizado basándose en el lazo de corriente de 4 a 20 mA, sin embargo, esta comunicación proporciona una información limitada. Para ampliar sus capacidades se desarrolló el protocolo de comunicación HART, el cual permite incorporar comunicación digital bidireccional manteniendo la señal analógica mediante la superposición de una señal modulada por desplazamiento de frecuencia (FSK) [10], [11].

El protocolo HART permite acceder a información adicional del instrumento, configurar sus parámetros, diagnósticos y tareas de mantenimiento mediante la comunicación entre un dispositivo maestro (HART) y un equipo de campo (transmisor). Pereira y sus colaboradores desarrollaron un analizador HART basado en LabVIEW, mientras que Wang y sus colaboradores demostraron la integración de instrumentos HART con sistemas informáticos para configuración y supervisión [11], [12]. Además, la utilización de descripciones genéricas de dispositivos facilita la interacción entre diferentes herramientas de gestión y equipos inteligentes [13].

La comunicación HART requiere que la electrónica del dispositivo sea capaz de intercambiar la señal digital sin afectar el funcionamiento normal del lazo. Dudáček y sus colaboradores desarrollaron un módulo de comunicación alimentado desde el propio lazo de corriente compatible con HART, mostrando la posibilidad de integrar esta tecnología en los instrumentos destinados a la automatización y control de procesos [14].

A pesar de las capacidades digitales de estos instrumentos, la calidad de la medición continúa dependiendo de factores metrológicos como el patrón utilizado, las condiciones del ensayo y la incertidumbre del sistema. Paseltiner y sus colaboradores resaltaron la necesidad de emplear referencias calibradas y sistemas adecuados para garantizar mediciones confiables de temperatura [15].

En función de lo expuesto, la presente investigación considera la utilización de la comunicación HART como herramienta para acceder al transmisor, verificar sus parámetros y efectuar las operaciones necesarias durante el procedimiento, mientras que los resultados obtenidos

permiten evaluar los cambios producidos en su respuesta. Con ello se busca establecer, a partir de datos experimentales, el aporte que puede ofrecer el protocolo HART dentro de las actividades de calibración para la medición de temperatura en aplicaciones industriales.

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La medición de temperatura constituye una función fundamental en los sistemas de instrumentación industrial, en donde los sensores resistivos de platino, como la Pt100, son empleados para obtener una relación definida entre resistencia eléctrica y temperatura, establecida para aplicaciones industriales mediante la norma IEC 60751 [16]. En estos sistemas, el transmisor procesa la señal proveniente del sensor y la convierte en información digital y en una salida analógica normalizada que generalmente es de 4 a 20 mA.

Durante la operación o configuración del transmisor pueden presentarse diferencias entre el valor de referencia aplicado, la variable primaria procesada internamente y la corriente analógica que se entrega al lazo. Una comprobación basada únicamente en la señal de 4-20 mA permite detectar una desviación, pero esta no determina directamente si es originada en la etapa de entrada, en el procesamiento de la variable o en la conversión digital-analógica, los transmisores inteligentes disponen de funciones diferenciadas de ajuste en la entrada y salida, por lo que su correcta selección requiere identificar previamente donde se encuentra la desviación [17].

El protocolo HART permite mantener la señal analógica de 4-20 mA, simultáneamente, y acceder internamente a las variables y parámetros internos del instrumento [18]. Por dicha razón, se identifica la necesidad de establecer un procedimiento experimental estructurado que permita comparar el valor de referencia con la variable primaria (PV), la salida analógica y la corriente medida, cuantificar el error antes y después del ajuste y así determinar técnicamente que la intervención mediante HART debe ejecutarse. De esta manera, el proceso puede ser documentado, producido y evaluado mediante criterios metrológicos de calibración y verificación [19].

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La verificación basada únicamente en la salida analógica de un transmisor de temperatura dificulta identificar el origen de sus desviaciones de medición, requiriéndose un procedimiento técnico mediante el protocolo HART que permita diagnosticar la etapa afectada, aplicar el ajuste correspondiente y evaluar cuantitativamente el error.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

Proceso de calibración y ajuste de transmisores inteligentes de temperatura.

2.3.2. Campo de acción

El ámbito de estudio será la 3310 Tecnología industrial en base a la nomenclatura de la UNESCO, debido a los procesos de control, cuyo núcleo de desarrollo se basa en la automatización e ingeniería de control de procesos.

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directo

El desarrollo del presente trabajo beneficia principalmente a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, especialmente a aquellos que realizan prácticas relacionadas con instrumentación industrial. El procedimiento desarrollado podrá servir como una guía para comprender la configuración, verificación y ajuste de los transmisores inteligentes de temperatura dentro de un entorno de laboratorio.

2.4.2. Indirecto

Los beneficiarios indirectos serán los docentes y futuros profesionales de la carrera de Ingeniería Electromecánica quienes dispondrán de la información técnica y metodológica que podrá contribuir tanto a su desarrollo en prácticas académicas y a la formación de competencias requeridas en el sector industrial.

De manera complementaria, el sector industrial puede beneficiarse indirectamente, ya que al tener profesionales capacitados sobre calibración con el comunicador HART estarán más preparados para el entorno laboral y sus exigencias.

2.5. JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo surge del interés por fortalecer los conocimientos adquiridos durante la formación en Ingeniería Electromecánica, especialmente en instrumentación, metrología y automatización industrial. El protocolo HART permite relacionar estos conocimientos con una aplicación práctica, ya que mantiene la señal analógica de 4-20 mA y al mismo tiempo, permite acceder a los parámetros internos digitalmente [18].

Desde al ámbito académico el proyecto permite profundizar en el funcionamiento de los transmisores inteligentes de temperatura, la relación entre resistencia-temperatura de una Pt100 y la diferencia entre la calibración, verificación y ajuste. La IEC 60751 establece los requisitos y la relación resistencia-temperatura para sensores industriales de platino [16], mientras que el VIM señala que la calibración no debe confundirse con el ajuste o con la verificación [19].

Se propone un procedimiento experimental reproducible para evaluar el transmisor en cinco puntos del rango, registrar la variable primaria (PV), la salida analógica (AO) y la corriente medida, calcular el error y comparar su comportamiento antes y después del ajuste, esta secuencia permite identificar la etapa donde se presenta una desviación y orientar la intervención correspondiente mediante HART [17].

El procedimiento puede utilizarse como una guía en prácticas de instrumentación y fortalecer competencias relacionadas con la configuración, diagnóstico y ajuste de transmisores inteligentes.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Aplicar un procedimiento técnico mediante protocolo HART en la calibración de un transmisor de temperatura, con diagnóstico de la etapa afectada, ajuste correspondiente y evaluación cuantitativa del error.

2.6.2. Específicos

- Fundamentar el procedimiento técnico mediante normas, artículos científicos y documentación oficial sobre metrología, señal de 4-20 mA y funciones de ajuste mediante protocolo HART.
- Ejecutar el procedimiento técnico de verificación, diagnóstico y ajuste del transmisor de temperatura mediante protocolo HART, registrando la variable primaria y la corriente medida en cinco puntos del rango bajo condiciones controladas.
- Evaluar el comportamiento del transmisor de temperatura mediante la comparación de los resultados de la variable primaria y la corriente de salida antes y después de la aplicación del procedimiento con protocolo HART.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

En la tabla 2.1.1 se aprecia las distintas actividades a realizar en base a los objetivos específicos que se plantearon, asegurando la trazabilidad del procedimiento experimental.

Tabla 2.1.1 Sistema de tareas.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Fundamentar el procedimiento técnico mediante normas, literatura científica y documentación oficial sobre Pt100, metrología, señal de 4–20 mA y funciones de ajuste mediante protocolo HART.	Revisión de normas, artículos científicos y documentación técnica.	Base técnica y normativa para el desarrollo del procedimiento de verificación, diagnóstico y ajuste.	Revisión documental, normas técnicas, artículos científicos, documentación oficial HART y manuales del fabricante.
	Selección y organización de los criterios aplicables al procedimiento experimental.		
Ejecutar el procedimiento técnico de verificación, diagnóstico y ajuste del transmisor de temperatura mediante protocolo HART, registrando la variable primaria (PV), la salida analógica (AO) y la corriente medida en cinco puntos del rango bajo condiciones controladas.	Montaje y verificación del lazo experimental.	Registro de las mediciones antes y después del ajuste.	Método experimental, transmisor de temperatura, HART 475 OEM, fuente de 24 VDC, resistencia de 250 Ω , multímetro, simulador resistivo Pt100.
	Aplicación de los cinco puntos de ensayo, registro de variables y ajuste HART según la desviación identificada.		
Evaluar el comportamiento del transmisor de temperatura mediante la comparación de los resultados de la variable primaria y la corriente de salida antes y después de la aplicación del procedimiento con protocolo HART.	Cálculo y comparación de los errores antes y después del ajuste.	Determinación cuantitativa del error y del desempeño final del transmisor.	Registro experimental, ecuaciones de error, tablas y gráficas elaboradas en hoja de cálculo.
	Evaluación del cumplimiento del criterio de aceptación.		

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

El uso de instrumentos inteligentes con comunicación HART ha sido estudiado desde diferentes enfoques relacionados con la medición, supervisión, configuración y verificación de variables industriales. Estos trabajos permiten conocer las aplicaciones que ya han sido desarrolladas y al mismo tiempo identificar aspectos que todavía requieren un análisis experimental específico en transmisores de temperatura,

Sánchez Silvera y Goche Infante llevaron a cabo en 2021 la investigación titulada Implementación de un módulo con sistema de periferia descentralizada HART, para el control de nivel y temperatura en la planta de tanques del Laboratorio de Control de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, en la Universidad Privada de Tacna. La finalidad del estudio fue desarrollar una solución de automatización que facilitara la gestión, visualización y control de las variables de nivel y temperatura a través de instrumentos industriales que sean compatibles con el protocolo HART. Los autores se apoyaron en la plataforma TIA Portal, el software Factory I/O y una estrategia de control PID. Los resultados obtenidos de la simulación indicaron que el módulo era capaz de integrar la medición de temperatura con un sistema de supervisión y control industrial. Dicho antecedente es muy relevante para la presente investigación, ya que demuestra la eficacia del protocolo HART en la comunicación de instrumentos de temperatura con plataformas de automatización, lo cual es fundamental porque transforma un sensor común en un nodo inteligente dentro de la planta, proporcionando datos que permiten anticipar fallos, optimizar ciclos de mantenimiento y verificar la salud del instrumento en tiempo real. De esta forma, la comunicación HART facilita la supervisión y el mantenimiento de los sistemas de instrumentación sin interrumpir la señal analógica utilizada para el control del proceso, mejorando así la eficiencia general de la planta [20].

En 2021, Abotaleb, Mindykowski, Dudojc y Masnicki publicaron un artículo titulado Enlaces de Comunicación Digital que Cooperan con el Estándar Analógico de 4–20 mA para Aplicaciones Marinas. Esta investigación indaga sobre la fusión de la señal analógica de 4 a 20 mA que son utilizados para los transmisores inteligentes, para las pruebas en la fase experimental se usó un transmisor de temperatura de la marca Rosemount 3244MV que usa el protocolo HART, una fuente de alimentación de 24VDC, una resistencia de 250 Ω , un cable de par trenzado blindado y unos comunicadores Emerson AMS Trex y Emerson 375. Con estos elementos los autores simulaban una temperatura de 44,35 °C, lo que vendría a ser una

corriente aproximada de 15,61 mA con esto analizaron qué pasaría con el desempeño entre la comunicación si hubiera fallos de conexión, vibraciones, humedad y una puesta tierra inadecuada. Lo que se evidenció es que bajo estas condiciones hay alteraciones en la señal y puede provocar la pérdida completa de comunicación. Con este estudio podemos ver que para un transmisor de temperatura no solo hace falta configurarlo bien para que haya una comunicación con el protocolo HART, sino que también depende las condiciones eléctricas del lazo de corriente [21].

Wintio, Dionova y Yusuf presentaron un procedimiento validación de lazos de entrada y salida para transmisores de precisión utilizando de manera conjunta la señal analógica de 4-20 mA y la comunicación digital HART. Para las pruebas emplearon un módem HART y el software FieldMate, con los cuales realizaron la supervisión digital de los transmisores mientras verificaban su respuesta analógica. Los resultados reportaron errores inferiores al 0,25% para equipos evaluados, los autores señalaron además que la integración de HART favoreció las tareas de diagnóstico y configuración, aunque el estudio fue realizado sobre transmisores de presión, su metodología resulta relevante porque demuestra la evaluación de un instrumento puede fortalecerse mediante la comparación entre información analógica y digital [22].

Un antecedente directamente relacionado con la metodología del presente proyecto fue desarrollado por Pullotasig Lema y Toaquiza Chimba en la Universidad Técnica de Cotopaxi durante 2026. Los autores evaluaron la aplicación del protocolo HART en la calibración de un transmisor de presión mediante cinco puntos distribuidos en 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del rango. Antes del ajuste encontraron errores cercanos al 5% del fondo de escala y, posteriormente, mediante ajustes de Zero Trim y Span Trim obtuvieron valores inferiores al 0,2%. Este trabajo demuestra que las funciones disponibles mediante HART pueden utilizarse dentro de un procedimiento de verificación y ajuste con resultados cuantificables. Su principal relación con esta investigación se encuentra en la secuencia antes-ajuste-después, no obstante, el estudio se desarrolló sobre la variable presión, mientras que el presente proyecto aborda las particularidades de un transmisor configurado para medición de temperatura [23].

En una aplicación recién enfocada directamente en temperatura, Lv desarrolló en 2026 un sistema de medición de temperatura y presión basado en HART. La arquitectura integro un convertidor analógico-digital AD779, un microprocesador MSP430, un modelo HART AD5700 y una interfaz de corriente XTR115. Para la medición de temperatura se empleó una Pt100, cuya resistencia fue adquirida y procesada digitalmente antes de transmitir la

información mediante un lazo de 4-20 mA con comunicación HART superpuesta. El estudio permite visualizar con claridad la cadena formada por sensor, adquisición, procesamiento, comunicación y salida de corriente, aspecto que resulta importante para comprender que una desviación puede analizarse en distintas etapas del transmisor, sin embargo, el trabajo se orientó al diseño de la arquitectura del sistema y no usa una comparación experimental del error antes y después de la aplicación de ajustes internos [24].

A partir de los antecedentes revisados se observa que HART ha sido utilizado para una supervisión, comunicación, diagnóstico, validación de lazos y ajuste de transmisores. También existen experiencias donde la calibración mediante HART ha producido reducciones cuantificables del error, principalmente en transmisores de presión, sin embargo, permanece la necesidad de estructurar un procedimiento experimental aplicado a un transmisor de temperatura que relacione el valor de referencia con la variable primaria (PV), salida analógica (AO) y la corriente medida, permitiendo identificar la etapa donde aparece la desviación, seleccionar el ajuste correspondiente y comprobar cuantitativamente el comportamiento del instrumento antes y después de la intervención.

3.2. INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La medición de temperatura en procesos industriales requiere de instrumentos capaces de transformar una variación térmica en una señal que pueda ser interpretada por los sistemas de monitoreo y control. Entre los dispositivos empleados para este propósito se encuentran los termopares, detectores resistivos de temperatura (RTD) y los transmisores de temperatura, cuya selección depende de las características de la aplicación y del principio de medición utilizado [25].

En los sensores RTD, la medición se obtiene a partir del cambio de la resistencia eléctrica de elemento sensor en función de la temperatura. Por otra parte, los termopares generan una diferencia de potencial relacionada con la temperatura existente en el punto de medición. En aplicaciones industriales, estas señales pueden ser recibidas por un transmisor encargado de acondicionarlas y convertirlas en información adecuada para su transmisión hacia otros dispositivos del sistema [25].

La cadena de medición, por tanto, no se limita al elemento sensor, en un transmisor inteligente, la señal proviene de una RTD o un termopar es adquirida por la electrónica del instrumento, convertida a información digital y posteriormente transmitida al sistema de control. En equipos compatibles con HART, esta información puede estar disponible mediante comunicación

digital mientras el instrumento mantiene su señal de proceso [17]. Para este trabajo esta estructura resulta importante debido a que permite analizar de manera separada el valor aplicado a la entrada, la variable primaria procesada por el transmisor y la señal analógica obtenida en el lazo de corriente.

3.2.1. Temperatura como variable de proceso

La temperatura es una magnitud física utilizada para describir el estado térmico de un cuerpo o sistema. Dentro del Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura termodinámica es el kelvin (K), sin embargo, en aplicaciones prácticas también se emplea el grado Celsius (°C), cuya magnitud es equivalente a la del kelvin para expresar diferencias o intervalos de temperatura. La relación entre ambas escalas se establece mediante una diferencia de 273.15 unidades [26].

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273.15 \quad (3.1)$$

En la instrumentación industrial, la temperatura puede ser medida mediante diferentes tecnologías, entre las que se encuentran los termopares y los detectores resistivos de temperatura. Estos últimos presentan una variación de su resistencia eléctrica en función de la temperatura aplicada, característica que permite utilizar elementos de platino como la Pt100 para obtener una señal relacionada con la condición térmica del proceso [25].

3.2.2. Sensores industriales de temperatura

Los sensores de temperatura constituyen el primer elemento de la cadena de medición, ya que responden ante variaciones térmicas del proceso y generan una señal que posteriormente puede ser acondicionada e interpretada por un transmisor. En aplicaciones industriales se utilizan diferentes tecnologías entre las que destacan de los detectores resistivos de temperatura (RTD) y los termopares, cuya selección depende principalmente del rango de trabajo, las condiciones del proceso y las características de medición requeridas [25].

Los sensores RTD determinan la temperatura a partir de la variación de la resistencia eléctrica de su elemento sensor. En aplicaciones industriales se emplea ampliamente el platino debido a que la relación definida entre resistencia y temperatura, dentro de esta tecnología se encuentra la Pt100, cuyo comportamiento se establece mediante la IEC 60751 [16].

Los termopares, por otra parte, generan una fuerza electromotriz relacionada con la diferencia de temperatura entre sus uniones. Existen diferentes tipos, como J, K, T, E, N, R, S y B,

definidos según la combinación de materiales utilizada y su comportamiento termoeléctrico. La IEC 6058-1 establece las funciones de referencia y tolerancias correspondientes a los termopares identificados mediante letras [27].

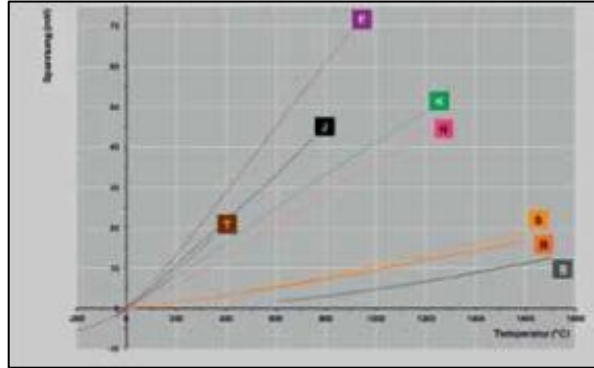


Figura 3.1. Curvas de tensión termoeléctrica en función de la temperatura para diferentes tipos de termopares [25].

La elección entre estas tecnologías depende de las necesidades de cada aplicación. Los termopares permiten trabajar en intervalos elevados de temperatura, mientras que las RTD proporcionan una señal resistiva que puede ser procesada por transmisores de temperatura. En el presente proyecto el análisis se centra en una RTD Pt100, debido a que este tipo de sensor corresponde a la configuración utilizada en el transmisor evaluado y permite establecer valores de resistencia conocidos para el desarrollo del procedimiento experimental.

3.3. TRANSMISORES INTELIGENTES DE TEMPERATURA

Los transmisores inteligentes de temperatura son instrumentos electrónicos destinados a recibir señales provenientes de sensores como RTD o termopares y convertirlas en información que pueda ser utilizada por los sistemas de supervisión y control. En el caso de los transmisores con comunicación HART, la señal de bajo nivel generada por el sensor es procesada digitalmente por el instrumento y posteriormente transmitida a través del mismo lazo utilizado para su alimentación y comunicación [17].

A diferencia de un transmisor exclusivamente analógico, un transmisor inteligente incorpora funciones de procesamiento y comunicación que permiten acceder a parámetros relacionados con su configuración y estado de funcionamiento. Un dispositivo de este tipo puede disponer de una salida analógica normalizada de 4–20 mA y, simultáneamente, de una interfaz digital HART destinada a la configuración, diagnóstico, monitoreo y consulta de variables del instrumento [28].

La señal de entrada depende del tipo de sensor conectado. Para un RTD, el transmisor interpreta una variación de resistencia eléctrica, mientras que para un termopar procesa una señal de tensión expresada en milivoltios. Una vez adquirida la señal, el transmisor realiza las operaciones internas necesarias para obtener la variable de temperatura y generar posteriormente la señal de salida correspondiente [28].

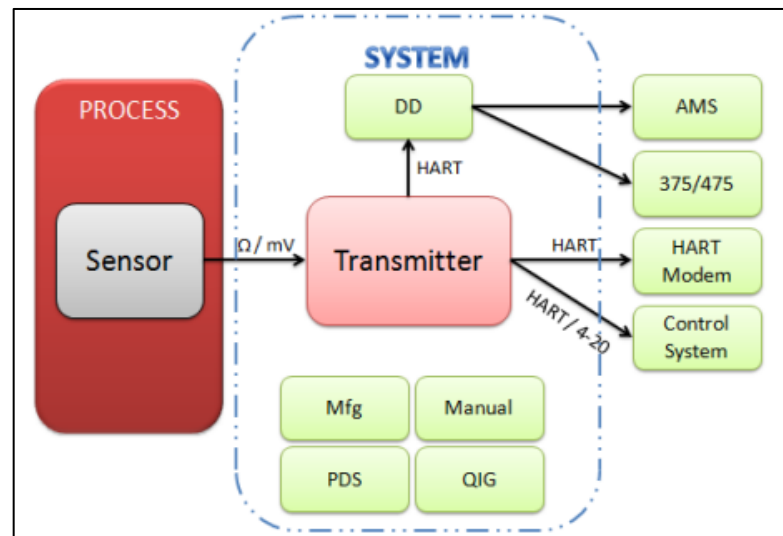


Figura 3.2. Diagrama de bloques de un sistema de medición con transmisor inteligente de temperatura [29].

3.3.1. Principio de funcionamiento de un transmisor inteligente

El funcionamiento de un transmisor inteligente de temperatura se inicia con la recepción de la señal eléctrica proveniente del sensor. En un RTD, esta señal está relacionada con la variación de resistencia, mientras que en un termopar corresponde a una señal de tensión. El transmisor interpreta esta información mediante su electrónica interna y la transforma en una variable de temperatura expresada en la unidad configurada [29].

La señal de entrada pasa inicialmente por una etapa de conversión analógico-digital, donde la magnitud eléctrica proporcionada por el sensor se convierte en información digital. Posteriormente, el microprocesador utiliza la caracterización almacenada en el transmisor para interpretar la señal y obtener el valor correspondiente de la variable de proceso. En los transmisores inteligentes, esta etapa permite realizar operaciones internas de linealización, configuración y ajuste de la medición [29].

Una vez procesada la información, el transmisor dispone de una etapa de conversión digital-analógica encargada de generar la señal analógica de salida, normalmente representada dentro del intervalo de 4 a 20 mA. Paralelamente, la comunicación HART permite acceder

digitalmente a información del instrumento mediante un comunicador compatible, sin depender exclusivamente de la medición de corriente del lazo [29].

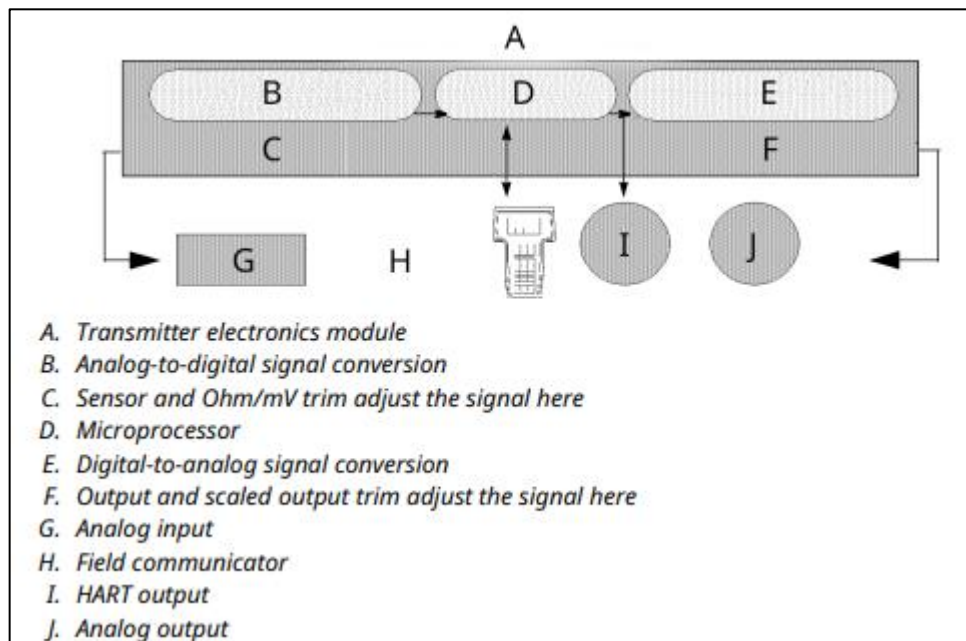


Figura 3.3. Etapas internas de procesamiento de un transmisor inteligente de temperatura [30].

La separación entre las etapas de entrada y salida resulta fundamental para el procedimiento desarrollado en este trabajo. El fabricante identifica que el ajuste de entrada del sensor actúa antes del procesamiento principal, mientras que el ajuste de salida interviene después de la conversión digital-analógica [29]. Por esta razón, la comparación entre el valor de referencia, la información digital del transmisor y la medida de corriente permite establecer con mayor claridad en qué parte de la cadena de medición se presenta una desviación.

3.3.2. Conversión analógico-digital

La conversión analógico-digital constituye una de las primeras etapas internas del procesamiento realizada por un transmisor inteligente de temperatura. La señal recibida depende del sensor conectado, en el caso de una RTD, la entrada está asociada a una variación de resistencia eléctrica, mientras que un termopar proporciona una señal expresada en milivoltios [28]. Estas magnitudes son interpretadas por la electrónica de entrada del transmisor antes de continuar con el procesamiento de la variable medida.

Dentro de la cadena interna del transmisor, la etapa de conversión analógico-digital transforma la señal eléctrica adquirida en información digital que posteriormente puede ser procesada por el microprocesador. El fabricante identifica esta conversión como una etapa independiente

ubicada entre la entrada analógica y el procesamiento interno del instrumento [29]. De esta manera, la información proveniente del sensor puede ser interpretada mediante la caracterización configurada para obtener posteriormente la variable de temperatura.

Esta etapa tiene especial importancia dentro del procedimiento de verificación planteado en el presente trabajo, debido a que una desviación entre el valor resistivo de referencia y la variable digital obtenida por el transmisor puede estar asociada a la cadena de entrada de la medición. La documentación técnica del fabricante ubica el ajuste del sensor en esta parte del procesamiento, antes del microprocesador y de la conversión digital-analógica [29]. Por ello, la evaluación de la entrada debe realizarse antes de atribuir una desviación únicamente a la señal de salida de 4–20 mA.

3.3.3. Procesamiento digital

Una vez realizada la conversión analógico-digital, la información obtenida de la señal del sensor es procesada internamente por el transmisor. En los transmisores inteligentes, este procesamiento se realiza a partir de características almacenadas en el firmware, mediante las cuales la señal de entrada es interpretada y convertida en una variable de proceso expresada en unidades de ingeniería, como grados Celsius [29].

Para sensores resistivos de temperatura, el procesamiento digital debe considerar la relación existente entre resistencia y temperatura. El Rosemount 248 dispone de una curva estándar almacenada para interpretar la señal proveniente del sensor y también permite utilizar constantes de Callendar–Van Dusen cuando se dispone de la caracterización específica de una RTD calibrada. Con estas constantes, el transmisor puede generar una curva particular que representa con mayor proximidad el comportamiento real del sensor [29].

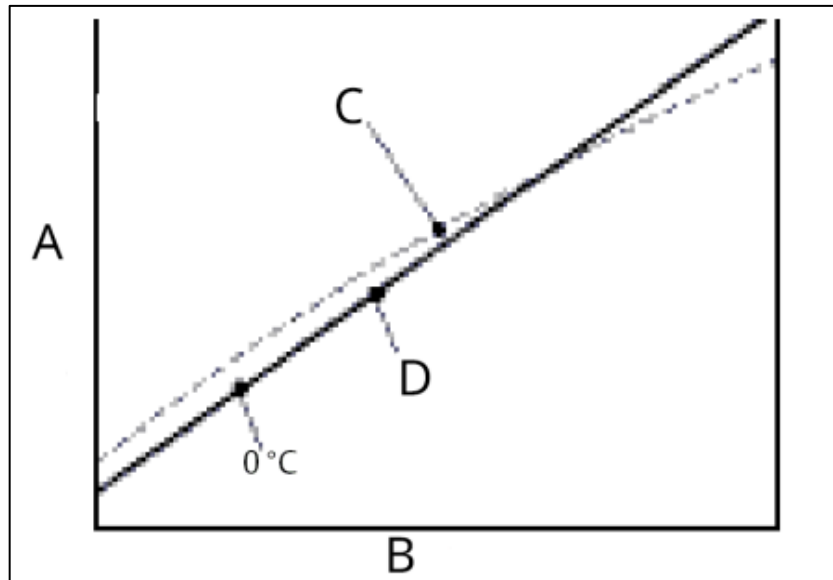


Figura 3.4. Comparación entre la curva estándar y la curva real de un sensor RTD [29].

El procesamiento digital también permite establecer parámetros relacionados con el tipo de sensor, número de conductores, unidades de ingeniería y amortiguamiento de la variable de proceso. Estos parámetros deben corresponder con las características reales del sistema de medición, debido a que una configuración inadecuada puede producir diferencias entre la señal resistiva aplicada y el valor de temperatura interpretado por el transmisor [29].

Dentro del procedimiento desarrollado en esta investigación, el valor digital obtenido después del procesamiento interno constituye un punto de comparación con la resistencia de referencia aplicada. Esta comparación permite evaluar la cadena de entrada antes de analizar la conversión digital-analógica y la corriente de salida del transmisor, facilitando la identificación de la etapa asociada a una posible desviación.

3.3.4. Conversión digital-analógica

Después del procesamiento de la señal de entrada, el transmisor debe convertir la información digital obtenida en una señal analógica que pueda ser utilizada por los equipos conectados al lazo de instrumentación. En los transmisores con salida de corriente, esta función corresponde a la etapa de conversión digital-analógica, ubicada después del microprocesador dentro de la cadena interna de medición [29].

La conversión digital-analógica establece la correspondencia entre el valor procesado de la variable y la corriente entregada por el transmisor. Para una salida normalizada de 4–20 mA, los valores de rango inferior y superior configurados en el instrumento determinan la relación

entre la variable de proceso y los extremos de la señal analógica. De esta manera, el transmisor proporciona una corriente proporcional al valor de la variable dentro del intervalo de medición establecido [29].

La documentación técnica de Emerson diferencia esta etapa de la conversión analógico-digital y ubica el ajuste de salida después de la conversión D/A. El fabricante establece que el ajuste de salida debe considerarse cuando el valor digital de la variable primaria coincide con la referencia utilizada, pero la señal analógica medida en el lazo presenta una diferencia respecto al valor esperado [29]. Esta diferenciación resulta importante para el presente estudio, ya que permite evaluar de manera independiente el comportamiento de la entrada y de la salida del transmisor antes de seleccionar el ajuste correspondiente.

3.4. SEÑAL NORMALIZADA DE 4-20 mA

Las señales analógicas de corriente continua son utilizadas en sistemas industriales de medición y control para transmitir información entre los diferentes elementos que forman parte de un proceso. La IEC 60381-1 establece el marco aplicable a este tipo de señales empleadas para la transmisión de información entre dispositivos de sistemas de medición y control industrial [30].

Dentro de la instrumentación de procesos, el intervalo de 4–20 mA permite representar de manera proporcional una medida variable. En un transmisor configurado para este tipo de salida, el límite inferior del rango se asocia con 4 mA y el límite superior con 20 mA, mientras que los valores intermedios representan proporcionalmente el comportamiento de la variable dentro del rango establecido. La diferencia entre ambos extremos corresponde a un tramo eléctrico de 16 mA.

En los transmisores compatibles con HART, la señal analógica de 4–20 mA continúa siendo utilizada para representar la variable primaria, mientras que la comunicación digital se incorpora de manera simultánea sobre el mismo medio físico [18]. De esta forma, el sistema puede disponer de la información analógica utilizada por el proceso y, adicionalmente, acceder a variables, parámetros y funciones internas del instrumento mediante comunicación HART.

3.4.1. Valor del rango inferior y valor del rango superior

En los transmisores inteligentes, el rango de medición se establece mediante el valor inferior de rango o LRV (Lower Range Value) y el valor superior de rango o URV (Upper Range Value). El LRV representa el límite inferior de la variable configurada, mientras que el URV

corresponde al límite superior. Estos parámetros permiten asociar el intervalo esperado de la variable de proceso con la señal analógica de salida del transmisor [17].

La modificación del LRV o URV corresponde a una configuración del rango de operación del transmisor y no debe confundirse con un ajuste de la medición. Emerson señala que el cambio de rango establece la correspondencia entre la entrada del sensor y la salida de 4–20 mA, pero no modifica la interpretación interna que realiza el transmisor sobre la señal de entrada [17]. Por esta razón, ante la presencia de una desviación, primero debe identificarse su origen antes de modificar parámetros de calibración o aplicar funciones de recorte.

3.4.2. Relación temperatura corriente

En un transmisor configurado con salida de 4–20 mA, la corriente analógica representa proporcionalmente el valor de la variable primaria dentro del rango establecido. Los valores LRV y URV definen los límites inferior y superior de la variable y establecen su correspondencia con la señal analógica del transmisor. Emerson indica que el cambio de rango relaciona la entrada del sensor con una salida de 4–20 mA, manteniendo diferenciada esta configuración de las funciones de ajuste o trim [17].

Para determinar la corriente correspondiente a cualquier punto comprendido entre el LRV y el URV puede emplearse una relación lineal entre el rango de la variable y el span de corriente. Para una variable de temperatura T, la corriente teórica se obtiene mediante:

$$I_t = 4 + \left(\frac{T - LRV}{URV - LRV} \right) * (20 - 4) \quad (3.2)$$

Donde:

I_t : Corresponde a la corriente teórica en miliamperios

T: Es la temperatura evaluada

LRV: Representa el valor inferior del rango

URV: Representa el valor superior del rango

Debido a que el intervalo de salida está comprendido entre 4 y 20 mA

En el presente trabajo, el transmisor se evalúa con un rango comprendido entre 0 °C y 100 °C.

Al sustituir estos valores en la ecuación anterior se obtiene:

$$I_t = 4 + \left(\frac{T - 0}{100 - 0}\right)(16) \quad (3.3)$$

por lo que la expresión puede simplificarse como:

$$I_t = 4 + 0,16T \quad (3.4)$$

Esta correspondencia constituye la base para comparar posteriormente la corriente teórica con la corriente medida durante los ensayos. La diferencia obtenida permitirá calcular el error de salida del transmisor y expresarlo respecto al span de 16 mA, tanto antes como después de la aplicación del procedimiento de ajuste.

3.5. FUNDAMENTOS METROLÓGICOS PARA LA CALIBRACIÓN

3.5.1. Calibración

La calibración constituye una operación metrológica mediante la cual, bajo condiciones especificadas, se establece una relación entre los valores proporcionados por referencias de medición, junto con sus incertidumbres asociadas, y las indicaciones obtenidas en el instrumento evaluado. Posteriormente, esta información puede utilizarse para relacionar una indicación con un resultado de medición [19].

De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología, la calibración puede expresarse mediante una función, una curva, un diagrama o una tabla de calibración, siempre considerando la información metrológica asociada al proceso [19]. Por esta razón, la calibración no debe entenderse únicamente como la acción de modificar parámetros del instrumento, sino como un proceso de comparación y establecimiento de relaciones entre valores de referencia e indicaciones.

Un aspecto fundamental es que la calibración no debe confundirse con el ajuste, el VIM establece expresamente que el ajuste corresponde a un conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medición para que entregue indicaciones prescritas, mientras que la calibración permite determinar previamente la relación existente entre la referencia y la respuesta del instrumento [19]. Después de un ajuste, normalmente es necesaria una nueva calibración para comprobar el comportamiento resultante del sistema de medición.

3.5.2. Ajuste

El ajuste de un sistema de medición comprende el conjunto de operaciones realizadas sobre el instrumento con el propósito de obtener indicaciones determinadas para valores conocidos de

la magnitud medida. De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología, estas operaciones pueden incluir ajustes de cero, desplazamiento y amplitud o ganancia, dependiendo de las características del sistema evaluado [19].

La aplicación de un ajuste requiere conocer previamente el comportamiento del instrumento, ya que su finalidad no es determinar el error, sino modificar su respuesta cuando se ha identificado una desviación que requiere corrección. Por esta razón, el VIM establece que el ajuste no debe confundirse con la calibración y señala que esta última constituye un requisito previo para realizarlo [19].

Después de efectuar un ajuste es necesario volver a evaluar el sistema de medición. El VIM indica que, una vez modificada la respuesta del instrumento, normalmente debe realizarse nuevamente una calibración [19]. De esta manera, es posible comprobar el comportamiento obtenido después de la intervención y determinar si la indicación presenta una mejor correspondencia con los valores utilizados como referencia.

En el procedimiento desarrollado en esta investigación, el ajuste se plantea únicamente después de una verificación inicial de la respuesta del transmisor. La comparación entre el valor resistivo equivalente aplicado, la variable digital obtenida mediante HART y la corriente de salida permite identificar la parte de la cadena donde se evidencia la desviación. Con base en este diagnóstico se selecciona la función de ajuste correspondiente y, posteriormente, se repiten los puntos de verificación para cuantificar el cambio obtenido.

3.5.3. Error absoluto

El error de medición permite cuantificar la diferencia existente entre el valor obtenido mediante un sistema de medición y el valor utilizado como referencia. El Vocabulario Internacional de Metrología define el error de medición como el valor medido menos un valor de referencia [19]. Esta diferencia conserva su signo y permite identificar la dirección de la reducción presentada por el instrumento.

Matemáticamente, el error de medición se expresa mediante:

$$e = x_m - x_{ref} \quad (3.5)$$

Donde:

e: error de medición

x_m: valor medido

x_{ref} : valor de referencia. Un resultado positivo indica que el valor medido se encuentra por encima de la referencia, mientras que un resultado negativo indica que se encuentra por debajo.

Cuando interesa conocer únicamente la magnitud de la desviación, sin considerar su dirección, en el presente trabajo se emplea el error absoluto, definido operacionalmente mediante:

$$E_{abs} = |x_m - x_{ref}| \quad (3.6)$$

Donde:

E_{abs} : representa la magnitud del error absoluto. Este resultado conserva la misma unidad de la magnitud analizada.

Para la evaluación de la salida analógica se emplea la corriente teórica correspondiente a cada punto del rango como valor de referencia. En este caso, el error absoluto de corriente se determina mediante:

3.5.4. Exactitud, tolerancia y criterio de aceptación

Para evaluar cuantitativamente el comportamiento de un instrumento es necesario disponer de límites o requisitos previamente establecidos. El VIM define el error máximo permitido como el valor extremo del error que una especificación o reglamento admite para una determinada medición, instrumento o sistema de medición [19]. El mismo documento señala que el término tolerancia no debe emplearse como sinónimo de error máximo permitido [19].

En la evaluación de la conformidad, la tolerancia corresponde a la diferencia entre los límites superiores e inferiores establecidos para una propiedad, mientras que el intervalo de tolerancia comprende los valores considerados permisibles. Por otro lado, el intervalo de aceptación corresponde al conjunto de valores medidos que permiten aceptar el elemento evaluado de acuerdo con una regla de decisión previamente establecida [31].

El criterio de aceptación debe definirse antes de interpretar el resultado de una verificación y debe estar sustentado en un requisito documentado, como una especificación técnica, una norma aplicable o las características declaradas por el fabricante. Cuando una medición se utiliza para declarar conformidad, también debe considerar la influencia de la incertidumbre y la regla empleada para aceptar o rechazar el resultado [31].

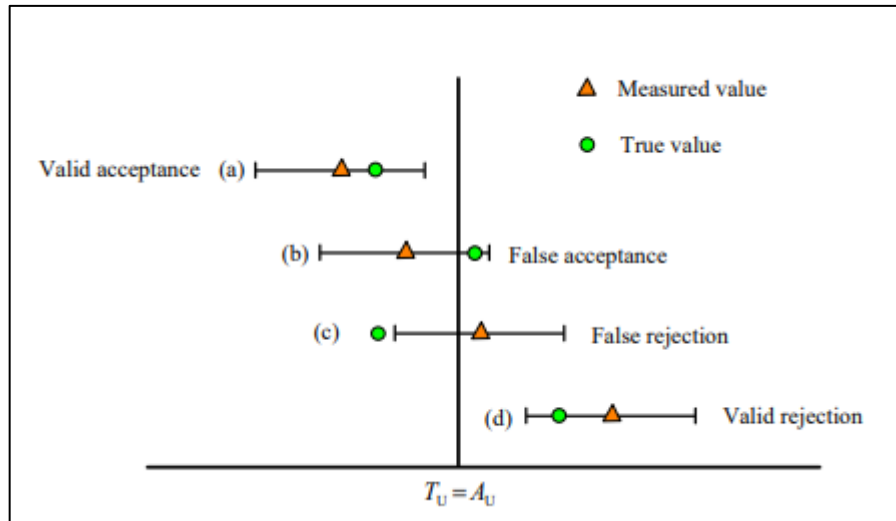


Figura 3.5. Regla de decisión por aceptación simple respecto a un límite de tolerancia [31].

3.6. PROTOCOLO HART

El protocolo HART o por siglas en (Highway Addressable Remote Transducer) usa una comunicación bidireccional utilizada para el intercambio de información entre instrumentos inteligentes de campo y sistemas o dispositivos encargados de su configuración, supervisión y control. Su principal característica es permitir la comunicación digital sin eliminar la señal analógica convencional utilizada en la instrumentación de procesos [18]. FieldComm Group define HART como un protocolo bidireccional que proporciona acceso a datos entre instrumentos inteligentes de campo y sistemas host.

En una instalación HART convencional, la señal analógica de 4–20 mA continúa representando la variable primaria del proceso, mientras que la información digital se superpone sobre el mismo lazo de comunicación. Esto permite disponer simultáneamente de dos canales de información: uno analógico, asociado principalmente con la variable de proceso, y otro digital, mediante el cual pueden transmitirse parámetros adicionales del dispositivo [18], FieldComm Group señala específicamente que la señal de 4–20 mA comunica la variable primaria (PV) como un valor analógico de corriente.

La comunicación digital amplía las posibilidades de interacción con el instrumento, debido a que permite consultar información que no se encuentra disponible únicamente mediante la medición de corriente. Entre sus aplicaciones se encuentran el acceso a variables del dispositivo, parámetros de configuración, información de diagnóstico y otras funciones propias del instrumento inteligente. Esta comunicación puede establecerse desde diferentes tipos de

sistemas host, incluyendo comunicadores portátiles, aplicaciones de software y sistemas de control o gestión de activos [18].

En el presente trabajo, la utilización de HART adquiere importancia porque permite complementar la evaluación de la señal analógica de 4–20 mA con información digital obtenida directamente del transmisor. De esta manera, el análisis no se limita a determinar si la corriente presenta una desviación, sino que también permite observar la variable primaria procesada por el dispositivo y utilizar esta información como parte del diagnóstico previo a la selección del ajuste correspondiente.

3.6.1. Principio de funcionamiento del protocolo HART

El funcionamiento del protocolo HART se basa en una comunicación bidireccional entre un dispositivo inteligente de campo y un sistema host. Este último puede corresponder a un comunicador portátil, una computadora o un sistema de control y supervisión. La comunicación permite intercambiar información digital con el instrumento mientras se mantiene disponible la señal analógica utilizada para representar la variable principal del proceso [18].

La coexistencia de los canales analógicos y digitales permite obtener información adicional sin sustituir necesariamente la salida convencional de corriente. En una instalación HART de 4–20 mA, la señal analógica representa la variable primaria, mientras que el canal digital permite acceder a información del dispositivo mediante un equipo compatible con el protocolo [18]. Esta característica hace posible utilizar la corriente del lazo para supervisión convencional y, al mismo tiempo, emplear la comunicación digital para configuración y diagnóstico.

En el procedimiento desarrollado en este trabajo, el comunicador HART establece comunicación con el transmisor para consultar la variable primaria y acceder a las funciones de configuración y ajuste disponibles. La información digital obtenida se compara con el valor resistivo equivalente aplicado a la entrada y con la corriente medida en el lazo, permitiendo evaluar diferentes etapas de la cadena de medición antes de seleccionar una acción de ajuste.

3.6.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

La comunicación del protocolo HART es de tipo digital y emplea el principio de modulación por desplazamiento de frecuencia, conocido como FSK (Frequency Shift Keying). En la implementación tradicional de HART sobre el lazo de 4–20 mA, esta técnica se basa en la señalización Bell 202 y permite representar la información digital mediante señales sinusoidales de dos frecuencias diferentes [32].

La señal digital utiliza una frecuencia de 1200 Hz para representar el bit lógico 1 y una frecuencia de 2200 Hz para representar el bit lógico 0, estas señales se superponen sobre el cableado que transporta la corriente continua del lazo, permitiendo que la información analógica y digital utilicen simultáneamente el mismo medio físico [32].

Una característica importante de esta modulación es que la señal FSK presenta un valor medio igual a cero. Por esta razón, su superposición no produce un desplazamiento del valor medio de la señal analógica de 4–20 mA. De esta manera, el valor de corriente puede continuar representando la variable primaria del proceso, mientras la información digital HART se transmite de forma simultánea [32], FieldComm Group también establece que en una instalación HART tradicional existen dos canales simultáneos de comunicación: uno analógico y otro digital [18].

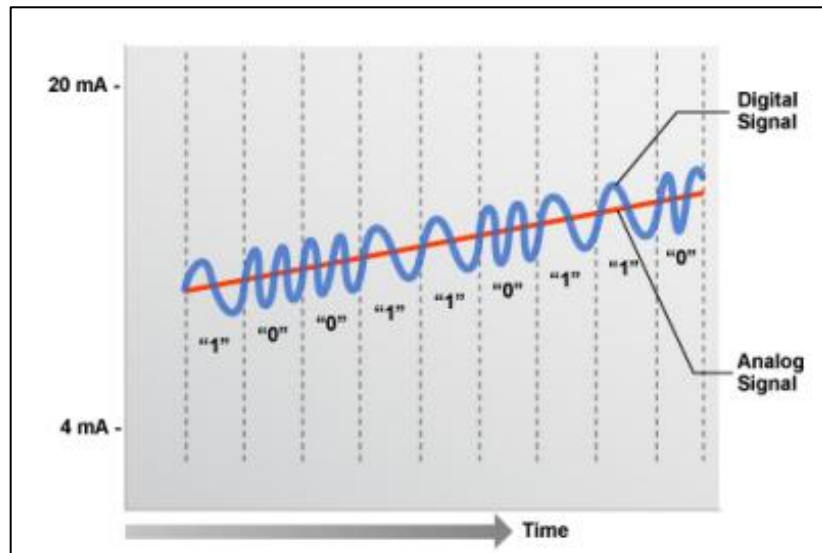


Figura 3.6. Superposición de la señal digital HART sobre la señal analógica mediante modulación FSK [34].

Esta característica resulta fundamental para el procedimiento desarrollado en el presente trabajo. Mientras la corriente del lazo permite evaluar básicamente la salida analógica del transmisor, el comunicador HART puede acceder a información digital procesada por el dispositivo, la coexistencia de ambas señales permite comparar la respuesta analógica con la variable primaria disponible digitalmente, sin requerir un segundo cableado exclusivo para la comunicación HART [18], [32].

3.6.3. Arquitectura de comunicación HART

La arquitectura de una comunicación HART punto a punto está formada por un dispositivo de campo, una fuente de alimentación, la carga del lazo y un dispositivo host encargado de

establecer la comunicación. En una aplicación convencional, el transmisor utiliza el mismo par de conductores para su alimentación y para transmitir la señal analógica de 4–20 mA, mientras que la información digital HART se intercambia a través del mismo circuito [18], [29].

El transmisor se conecta en serie con la fuente de alimentación y con la carga del lazo. El comunicador HART, por su parte, se conecta en paralelo en un punto apropiado del circuito, de manera que pueda detectar e intercambiar la señal digital sin interrumpir la corriente de proceso.

La carga eléctrica del lazo constituye un elemento necesario para establecer correctamente la comunicación HART. Para el Rosemount 248, Emerson especifica una resistencia total de carga comprendida entre 250 Ω y 1100 Ω cuando se utiliza comunicación mediante un comunicador de campo, de la misma manera en la sección de diagnóstico se recomienda verificar que exista como mínimo una resistencia de 250 Ω entre la fuente de alimentación y el punto de conexión del comunicador cuando el instrumento no establece comunicación [29].

En el procedimiento experimental desarrollado en este trabajo, esta arquitectura permite mantener simultáneamente la medición de la corriente de salida y la comunicación digital con el transmisor. De esta manera, el multímetro puede emplearse para registrar la corriente del lazo, mientras que el comunicador HART accede a la información digital y a las funciones de configuración y ajuste disponibles en el dispositivo.

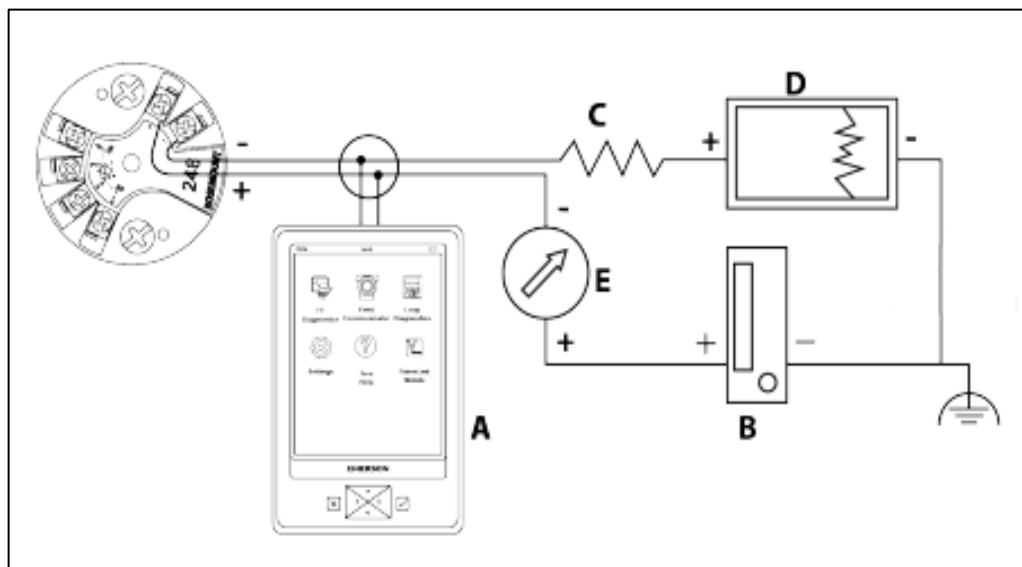


Figura 3.7. Arquitectura de conexión de un transmisor con comunicación HART y lazo de 4–20 mA [29].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La metodología propuesta tiene como finalidad establecer un procedimiento experimental ordenado para evaluar y ajustar un transmisor de temperatura compatible con el protocolo HART, utilizando una entrada resistiva mediante un potenciómetro de precisión que representa como diseño experimental el comportamiento eléctrico de un sensor Pt100. El procedimiento se desarrollará mediante un montaje compuesto por un transmisor de temperatura con comunicación HART, una fuente de alimentación de 24 VDC, un potenciómetro de precisión utilizado como simulador resistivo de Pt100, un multímetro digital, un comunicador HART 475 OEM y una resistencia de carga de 250 Ω . El principal será comparar el valor de temperatura que interpreta el transmisor propósito, denominado variable primaria o PV, con un valor de referencia obtenido a partir de la resistencia aplicada por el potenciómetro, cuya equivalencia en temperatura se determinará mediante la relación resistencia-temperatura establecida para sensores de platino en la norma IEC 60751:2022 [16].

En este trabajo no se utilizará una Pt100 física como elemento de referencia durante el procedimiento de calibración. En su lugar, se empleará un potenciómetro de precisión para reproducir eléctricamente los valores de resistencia que deberían presentar una Pt100 a diferentes temperaturas. Esta decisión responde principalmente a que no se dispone de un baño termostático, bloque seco u otro sistema capaz de generar y mantener temperaturas de referencia controladas con suficiente estabilidad para efectuar directamente una calibración térmica. Utilizar una Pt100 real sin una fuente térmica controlada introduciría variables adicionales relacionadas con la temperatura real del medio, estabilidad térmica, gradientes de temperatura, tiempo de respuesta y características propias del sensor. Al utilizar el potenciómetro se puede estudiar específicamente la respuesta del transmisor ante una entrada resistiva conocida, sin que el resultado dependa de un proceso térmico externo.

Esta forma de realizar el ensayo también es coherente con el alcance de la IEC 62828-3:2018, norma destinada específicamente a los procedimientos de ensayo de transmisores de temperatura. La norma indica que, cuando el transmisor de temperatura está separado del elemento sensor, los procedimientos pueden aplicarse al transmisor sin incluir el elemento de detección. Por esta razón, la metodología planteada no pretende calibrar una Pt100 física, sino comprobar cómo el transmisor interpreta eléctricamente los valores equivalentes a una Pt100 y cómo los convierte en una variable digital de temperatura y en una señal analógica de 4 a 20 mA.

La variable principal que se analizará será la temperatura indicada digitalmente por el transmisor a través del comunicador HART, es decir, el valor PV. La salida analógica AO también será registrada, pero tendrá una función secundaria de verificación. En el transmisor utilizado para este estudio, las opciones disponibles mediante el comunicador HART 475 OEM permiten realizar el ajuste denominado Zero PV, pero no se dispone de las funciones de ajuste de span, ajuste de sensor de dos puntos ni ajuste de salida. Debido a esta limitación propia del equipo, no se modificará la salida analógica AO durante el procedimiento. Su valor será observado y comparado con la corriente teórica que debería corresponder a cada temperatura para comprobar que la conversión del transmisor mantiene coherencia con el rango configurado.

Desde el punto de vista metrológico, es importante diferenciar la calibración del ajuste. El Vocabulario Internacional de Metrología, JCGM 200:2012, establece que una calibración determina la relación entre los valores proporcionados por referencias y las indicaciones correspondientes del sistema de medición, mientras que advierte expresamente que la calibración no debe confundirse con el ajuste. De igual forma, defina el ajuste de cero como una operación mediante la cual el sistema se ajusta para proporcionar la indicación correspondiente al valor cero. Por esta razón, el trabajo se desarrollará mediante una primera verificación en cinco puntos, seguida del ajuste Zero PV cuando existe desviación en el punto inferior y, finalmente, una segunda verificación de los mismos cinco puntos. De esta manera será posible comparar la respuesta antes y después del ajuste y determinar el efecto real producido por la aplicación de HART [19].

4.1. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL

La variable de entrada del procedimiento será la resistencia eléctrica aplicada al transmisor, denominada en este trabajo (R_{real}), expresada en ohmios. Este valor se generará mediante el potenciómetro de precisión y representará eléctricamente la resistencia que tendría una Pt100 a una determinada temperatura. Debido a que la entrada física del transmisor será una resistencia y no una temperatura real, la temperatura utilizada como referencia no será medida directamente; se calculará a partir del valor de resistencia mediante la relación definida para Pt100 en IEC 60751. Por este motivo, durante la toma de datos se debe distinguir entre la resistencia estrictamente aplicada y la temperatura equivalente calculada.

La temperatura equivalente de referencia se denominará (T_{ref}) y estará expresada en grados Celsius. Esta variable se obtendrá matemáticamente a partir de la resistencia real medida en el

potenciómetro, no se deberá asumir que el potenciómetro se encuentra exactamente en el valor nominal calculado.

La principal variable de salida será (PV_HART), expresada en °C, correspondiente a la temperatura interpretada digitalmente por el transmisor y consultada mediante el comunicador HART 475 OEM. Esta variable será comparada directamente con (T_ref). A partir de ambas magnitudes se calculará el error de medición del transmisor. El JCGM 200:2012 define el error de medición como el valor medido menos el valor de referencia, por lo que esta será la definición adoptada en el análisis experimental.

Además, se registrará la variable (AO_HART), expresada en mA, que corresponde al valor de salida analógica reportado digitalmente por el transmisor mediante HART. También se verificará la corriente real del lazo medida con el multímetro digital conectado en serie. Estas dos variables no serán utilizadas para modificar o ajustar la salida del transmisor, debido a que el dispositivo bajo estudio no dispone del procedimiento Output Trim mediante el comunicador utilizado. Su función será comprobar que la corriente reportada por HART mantiene correspondencia con la corriente presente esencialmente en el lazo y con la corriente teórica asociada con la temperatura aplicada.

Las variables que deberán mantenerse constantes durante el procedimiento serán la configuración del transmisor para una entrada Pt100 compatible con el simulador resistivo, el rango configurado de 0 a 100 °C, la alimentación nominal de 24 VDC, la resistencia de comunicación de 250 Ω y la disposición física de las conexiones. Mantener estas condiciones permite que las variaciones observadas entre los diferentes puntos se relacionen principalmente con la respuesta del transmisor y no con modificaciones introducidas en el montaje.

4.2. RESISTENCIAS EQUIVALENTES A LA Pt100

Para establecer cada valor del potenciómetro se utilizará la relación resistencia–temperatura correspondiente a la curva Pt100 normalizada. En el intervalo positivo empleado en este trabajo, comprendido entre 0 °C y 100 °C, la ecuación aplicable puede expresarse como:

$$R_T = R_0[1 + At + Bt^2] \quad (4.1)$$

Donde:

R_T: Representa la resistencia equivalente de la temperatura (°C), expresada en ohmios (Ω).

R_0: Es el punto de partida y el dato más importante para identificar el tipo de sensor con el que se está trabajando. Para nuestro caso al querer simular la resistencia de una Pt100 a base de un potenciómetro de precisión se toma el dato de la resistencia nominal del sensor y en este caso debe ir $R_0 = 100 \, \Omega$. Si se usara otro sensor de temperatura, en este apartado debería ir la resistencia nominal de dicho sensor.

t: Representa la temperatura (°C) en la que se desea conocer su valor en ohmios.

$$A = 3.90083 * 10^{-3} \quad (4.2)$$

$$B = -5.7750 * 10^{-7} \quad (4.3)$$

Estos coeficientes corresponden a la relación normalizada utilizada para la curva Pt100 conforme a IEC 60751. La documentación técnica de Fluke reproduce estos valores e identifica expresamente IEC 60751 como una de las normas de procedencia de la ecuación y de los coeficientes.

Debido a que el rango experimental de 0 a 100 °C se encuentra completamente por encima de 0 °C, no será necesario incorporar el término cúbico adicional $[C * (t - 100 \, ^\circ\text{C}) * t^3]$, ni el valor de su variable $C = -4.183 * 10^{-12}$, utilizado para temperaturas negativas. Esta decisión mantiene el modelo limitado únicamente a las condiciones realmente evaluadas y evita introducir expresiones que no intervienen en el procedimiento. Si posteriormente el rango experimental fuera extendido a valores inferiores a 0 °C, será necesario incorporar la ecuación correspondiente a dicha región.

El valor nominal no se usará automáticamente como valor real de referencia. Debido a la resolución del potenciómetro, resistencia de los conductores, contactos y capacidad de lectura del multímetro, puede existir una pequeña diferencia entre la resistencia calculada y la resistencia estrictamente aplicada. Por ello, una vez ajustado el potenciómetro, su resistencia efectiva deberá comprobarse con el multímetro antes de conectar el transmisor. Si el valor medido difiere del nominal, el dato real será registrado como (R_real).

Para transformar posteriormente la resistencia real medida en una temperatura equivalente, puede despejarse (t) de la ecuación cuadrática correspondiente al intervalo positivo. La expresión utilizada será:

$$T_{ref} = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_{real}}{R_0})}}{2B} \quad (4.4)$$

Donde:

T_{ref}: Representa la temperatura equivalente de referencia en °C;

R_{real}: Es la resistencia realmente medida en los terminales del simulador resistivo

R₀: Corresponde a 100 Ω, definido anteriormente

(A) y (B): Conservan los valores definidos anteriormente.

4.2.1. Selección de los cinco puntos de calibración y verificación.

El intervalo de trabajo configurado de 0 a 100 °C se dividirá en cinco puntos distribuidos uniformemente: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del rango. Para el rango seleccionado, dichos porcentajes corresponden a 0 °C, 25 °C, 50 °C, 75 °C y 100 °C. Se eligió esta distribución porque permite evaluar los dos extremos del intervalo y tres posiciones intermedias, haciendo posible observar no solamente el comportamiento del zero, sino también si después del ajuste existe una desviación progresiva hacia la mitad o hacia el extremo superior del rango.

En el presente trabajo, la selección de cinco puntos constituye una decisión del diseño experimental que busca distribuir de manera uniforme las verificaciones a través del rango completo. Como respaldo de que esta distribución es utilizada en instrumentación industrial, la documentación de producto del transmisor Rosemount 3144P de Emerson incluye una opción denominada “calibración de cinco puntos”, desarrollada precisamente a 0, 25, 50, 75 y 100 % de los puntos de salida analógica y digital. Esta referencia no se utilizará como norma obligatoria para el transmisor estudiado, sino como evidencia de una práctica industrial documentada de calibración multipunto [33].

4.2.2. Cálculo de la corriente teórica

Aunque la salida analógica AO no será ajustada mediante HART, será necesario conocer la corriente teórica asociada con cada punto para comprobar el comportamiento de la conversión del transmisor. Para un transmisor configurado linealmente entre 4 y 20 mA, la corriente ideal se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$I_t = 4 + \left(\frac{T - LRV}{URV - LRV} \right) * (20 - 4) \quad (4.5)$$

Esta fórmula fue adaptada a nuestra necesidad y proviene de la ecuación de la recta:

$$y = mx + b \quad (4.6)$$

Como el rango es 0-100 (°C), la ecuación 4.5 se simplifica a la siguiente ecuación:

$$I_{teo} = 4 + 0.16(T_{ref}) \quad (4.7)$$

4.3. DISEÑO Y CONEXIÓN DEL CIRCUITO EXPERIMENTAL.

El circuito se construirá como un lazo de corriente alimentado a 24 VDC, donde el terminal positivo de la fuente será conectado al terminal positivo de alimentación del transmisor. Desde el terminal negativo del transmisor se iniciará el circuito hacia la entrada de corriente del multímetro digital, manteniendo al multímetro conectado en serie. Desde el terminal COM del multímetro se continuará hacia la resistencia de 250 Ω y, finalmente, desde dicha resistencia se retornará al terminal negativo de la fuente de 24 VDC. De esta manera, la misma corriente que circula por el transmisor atravesará el multímetro y la resistencia de carga. La ficha de datos de los elementos se visualiza en el anexo 1.

El comunicador HART se conectará en paralelo con la resistencia de 250 Ω , permitiendo superponer la comunicación digital HART sobre el lazo analógico sin interrumpir la medición de corriente. Se usa una resistencia de 250 porque es el mínimo requerido, dicha especificación se encuentra en el manual de Rosemount donde se explica que debe haber una resistencia de entre 250 y 1100 Ω , el colocar la resistencia en lazo de corriente es muy importante porque permite la correcta comunicación del Comunicador HART ya que esta trabaja mediante una señal de voltaje y al colocar la resistencia transforma las variaciones de corriente digital en voltaje, por ejemplo, ($1 \text{ mA} * 250 \Omega = 250 \text{ mV}$), que el comunicador detecta sin errores.

El potenciómetro de precisión se conectará exclusivamente a los terminales destinados a la entrada del sensor del transmisor. En el dispositivo utilizado experimentalmente, la simulación resistiva se realiza entre los terminales identificados como 2 y 3; Sin embargo, esta identificación deberá sustentarse con la ficha o diagrama específico del equipo y no generalizarse a todos los transmisores de temperatura, debido a que la numeración de terminales depende del fabricante.

En la Figura 4.1 se aprecia la conexión de cada uno de los elementos, cerrando el lazo para la verificación de las lecturas. El plano en Autocad se visualiza en el anexo 3.

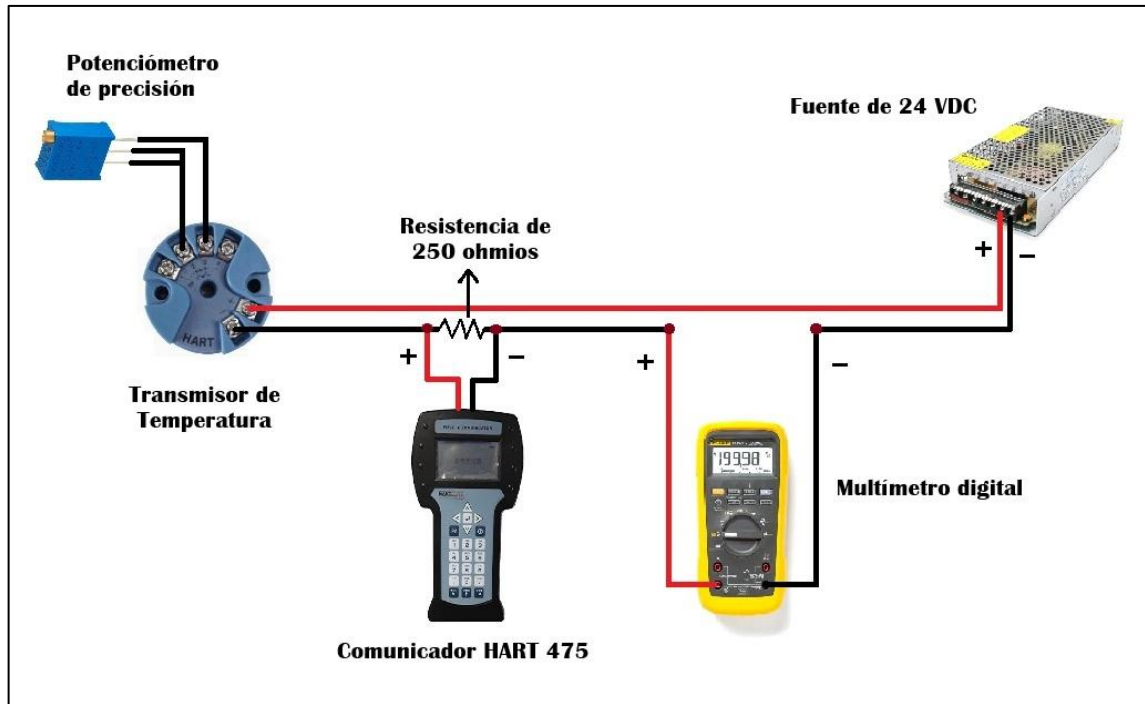


Figura 4.1. Cableado del montaje experimental.

4.4. PREPARACIÓN DEL SIMULADOR RESISTIVO

Antes de establecer cada punto de ensayo, la alimentación del montaje deberá estar desconectada o el potenciómetro deberá aislarse eléctricamente del transmisor para poder comprobar su resistencia con el multímetro. Este paso es importante porque el multímetro no debe utilizarse en el modo de resistencia sobre un componente conectado a un circuito energizado.

Una vez aislado el potenciómetro, deberá ajustarse lentamente hasta aproximarse al valor nominal calculado mediante la ecuación 4.1. Para el primer punto se buscarán aproximadamente 100.000Ω . Para los puntos siguientes se ajustarán aproximadamente 109.74Ω , 119.40Ω , 128.99Ω y 138.51Ω . No será necesario alcanzar todos los valores con una cantidad de decimales mayor que la resolución real disponible, ya que eso daría una falsa impresión de exactitud.

Una vez registrada (R_{real}), se calculará su temperatura equivalente (T_{ref}) mediante la ecuación 4.4. Posteriormente se desconectará el multímetro de la función de ohmímetro, se restablecerá el montaje para medir corriente y se conectará el potenciómetro a los terminales del transmisor. La secuencia de ajuste, medición, registro y reconexión deberá mantenerse igual en los cinco puntos para asegurar uniformidad en el procedimiento.

4.4.1. Verificaciones previas mediante el comunicador HART 475 OEM

Con el circuito correctamente conectado y energizado se establecerá comunicación con el transmisor mediante el HART 475 OEM. Antes de efectuar cualquier ajuste deberá verificarse la identificación del dispositivo, la presencia de la variable primaria PV, la salida AO y la configuración del tipo de sensor y rango. Esta etapa permite detectar configuraciones incorrectas antes de generar datos experimentales.



Figura 4.2. Pantalla del comunicador HART 475 OEM durante la detección del transmisor.

Luego, se verificó el (LRV = 0; °C) y (URV = 100; °C), así como la correspondencia de estos valores con la señal de 4 y 20 mA. No se deberán modificar estos parámetros durante la toma inicial ni durante la toma posterior, ya que el objetivo consiste en estudiar específicamente el efecto del ajuste Zero PV.

La función Zero PV únicamente deberá ejecutarse después de haber completado la medición inicial de los cinco puntos. Si se aplicará antes de obtener la condición inicial del transmisor se perdería la información necesaria para demostrar qué diferencia existía antes del ajuste. La ruta exacta utilizada en el comunicador HART para ejecutar Zero PV se visualiza el literal 4.5.1, la guía de instrucciones a seguir.

4.5. INSTRUCCIONES DE NAVEGACIÓN COMUNICADOR HART

En la Figura 4.3 se aprecia que función cumplen cada uno de los teclados del Comunicador HART 475 OEM



Figura 4.3. Función de los teclados del comunicador HART 475 OEM.

4.5.1. Guía de uso del comunicador HART 475 OEM

A continuación, se presenta la guía de uso del comunicador HART 475 para los ajustes previos y la calibración mediante la función Zero PV.

La guía incluye el procedimiento utilizado para ingresar a los diferentes menús disponibles en el transmisor, verificar la configuración del sensor y del rango de medición, consultar los valores de proceso y ejecutar la función Zero PV, que corresponde al ajuste disponible en el equipo utilizado. Debido a que las opciones mostradas por el comunicador dependen del transmisor conectado, la guía se elaboró tomando como referencia exclusivamente las funciones observadas durante el desarrollo experimental

GUIA DE PROCESO

PASO 1: ENCENDER EL COMUNICADOR



1

Presionamos aquí por un lapso de 3 segundos



2

Esperamos unos segundos hasta que se encienda el equipo.

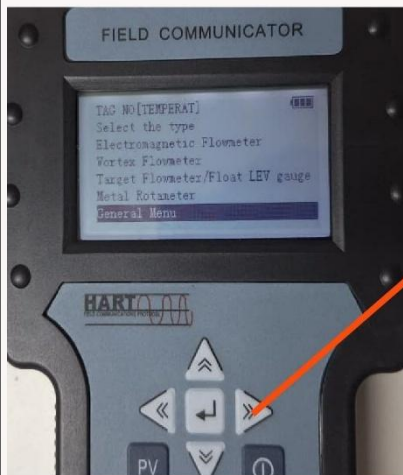


3

El equipo debe estar conectado en paralelo con la resistencia de 250 ohmios, solo así el equipo lo detectará

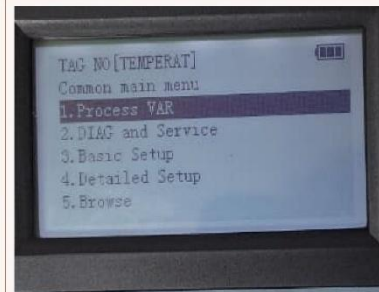
GUIA DE PROCESO

PASO 2: ACCEDER AL MENÚ PRINCIPAL



4

Nos llevará las siguientes opciones, elegiremos la opción General Menu seleccionamos con la tecla derecha.



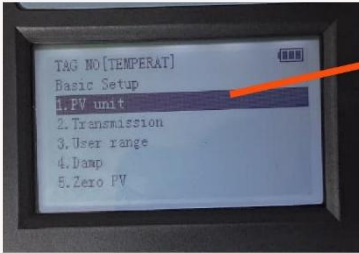
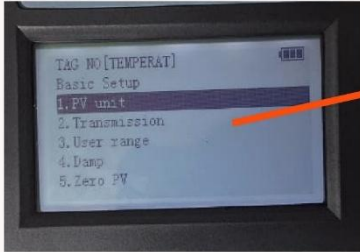
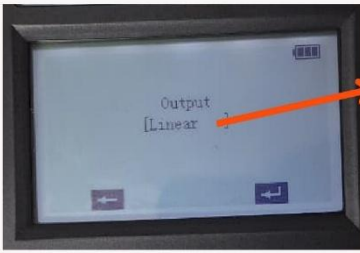
5

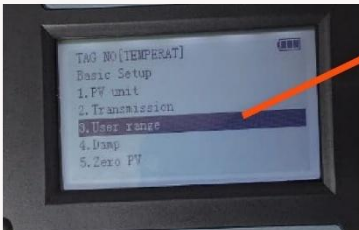
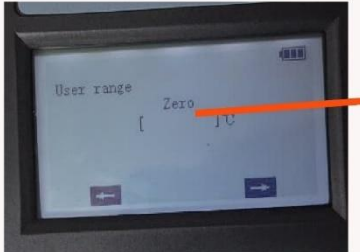
Encontraremos las siguientes opciones



6

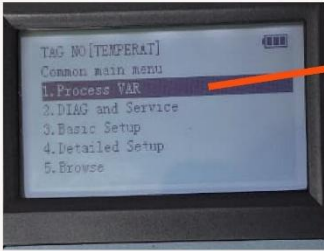
Empezaremos por la opción Basic Setup, para ir configurando los parámetros que se desea.

GUIA DE PROCESO	
PASO 3: CONFIGURAR PARÁMETROS	
	Iniciamos con PV unit, en donde vamos a elegir la unidad en la que se va a trabajar. 7
	Luego vamos a Transmission 9
	En nuestro caso elegimos grados Celcius (°C) 8
	Aquí elegimos la opción lineal ya que la temperatura tiene una relación directamente proporcional con la señal eléctrica del sensor. 10

GUIA DE PROCESO	
PASO 3: CONFIGURAR PARÁMETROS	
	Seguimos con la opción User range 11
	Seleccionamos rango bajo y aquí asignamos el valor que en nuestro caso es 0°C 13
	Aquí designamos el rango en el que se va a trabajar, en nuestro caso lo haremos de 0°C a 100°C 12
	Luego seleccionamos rango alto y aquí asignamos el valor que en nuestro caso es 100°C 14

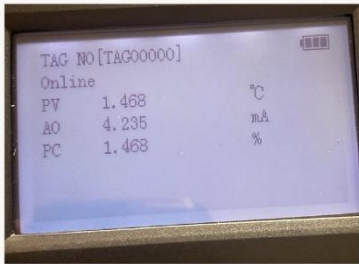
GUIA DE PROCESO

PASO 4: VERIFICACIÓN DE VALORES.



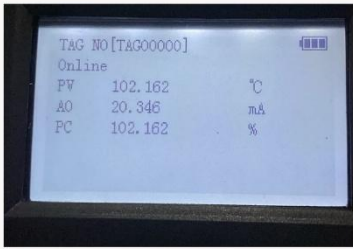
Una vez configurado regresamos a la opción Process VAR

15



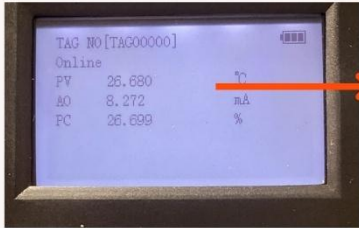
Aquí vamos a ver los datos que nos proporciona Hart en cada punto de prueba según la tabla de resistencia, para así poder determinar donde hay que hacer una corrección,

17



Aquí el equipo nos permite ver valores como Variable primaria (PV), salida analógica (AO) y porcentaje del rango configurado (PC).

16

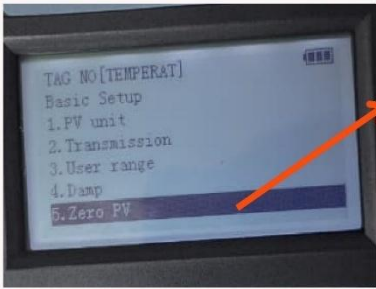


En nuestro caso tenemos un error en valor primario PV y en la salida analógica AO

18

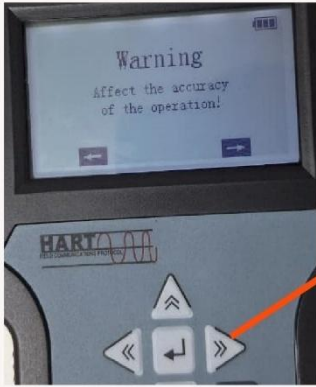
GUIA DE PROCESO

PASO 5: CALIBRACIÓN



Para realizar esa calibración primero debemos tener en nuestro potenciómetro una resistencia de 100 ohmios y así poder seleccionar la opción de Zero PV

19



Cuando seleccionamos la opción zero PV nos llevará a la siguiente ventana donde tenemos que precionar la flecha hacia la derecha.

20

37

PASO 5: CALIBRACIÓN



Después de hacer esa calibración nos dirigimos nuevamente a la opción de Process VAR ahí veremos que ya tenemos errores mínimos.

21

4.6. PRIMERA VERIFICACIÓN ANTES DEL AJUSTE

La primera etapa experimental tendrá como finalidad conocer el comportamiento inicial del transmisor. Para ello se comenzará aplicando la resistencia correspondiente al 0 % del rango. Con el simulador correctamente conectado y el sistema energizado se esperará a que las lecturas permanezcan estables antes de registrar datos. Se anotarán la resistencia real previamente comprobada (R_{real}), la temperatura equivalente calculada (T_{ref}), el valor (PV_HART) y el valor (AO_HART).

Después de finalizar el primer punto se comenzará con 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, manteniendo el mismo procedimiento. Se utilizará preferentemente una secuencia ascendente de resistencia para evitar modificar innecesariamente el sentido de ajuste del potenciómetro y mantener consistentes las condiciones de ensayo. La misma dirección deberá utilizarse en la evaluación posterior al Zero PV para que ambas series sean comparables.

No se realizará ningún ajuste durante esta primera secuencia, si en el punto de 0 °C la lectura del transmisor indica, por ejemplo, 1.4 °C, ese valor deberá conservarse y registrarse como resultado “antes del ajuste”. De igual manera, si los puntos superiores presentan desviaciones, deberán registrarse sin corregirlos individualmente. Esta primera serie representa la condición inicial necesaria para comparar posteriormente el efecto de Zero PV.

4.6.1. Cálculo del error de medición en PV

El error utilizado como indicador principal será el error de medición con signo, calculado de acuerdo con la definición 2.16 del JCGM 200:2012. El documento define el error de medición como el valor medido menos el valor de referencia [19]. En consecuencia, para este experimento se establecerá:

$$e_{PV} = PV_{HART} - T_{ref} \quad (4.8)$$

Donde:

e_{PV} : Representa el error de medición, expresado en °C.

PV_{HART} : Corresponde a la temperatura indicada por el transmisor mediante HART.

T_{ref} : Corresponde a la temperatura equivalente calculada a partir de la resistencia realmente aplicada.

El signo del error deberá conservarse porque proporciona información útil sobre el comportamiento del transmisor. Un error positivo significará que el transmisor indica una temperatura mayor que la temperatura equivalente aplicada y un error negativo significará que el transmisor indica por debajo del valor de referencia.

4.7. EJECUCIÓN DEL AJUSTE ZERO PV

Una vez terminada y registrada la serie inicial de cinco puntos, el simulador resistivo deberá regresar al valor correspondiente al límite inferior del rango. Para una Pt100 en un rango de 0 a 100 °C, este punto corresponde nominalmente a 100 Ω y representa 0 °C. Nuevamente deberá verificarse la resistencia real y determinarse su temperatura equivalente antes de ejecutar cualquier ajuste.

El comando Zero PV solamente deberá aplicarse con una entrada que represente correctamente el punto cero utilizado en el experimento. No debe ejecutarse con el potenciómetro situado en 25 °C, 50 °C u otro punto del rango, debido a que se estaría solicitando al transmisor que tome una condición diferente como referencia de cero, provocando un desplazamiento incorrecto de toda la medición.

Desde el punto de vista de la terminología metrológica, esta acción se describirá como un ajuste de cero de la variable primaria. El JCGM 200:2012 define el ajuste de cero como el ajuste de un sistema de medición de forma que proporciona una indicación nula correspondiente a un valor cero de la magnitud que se mide [19].

4.7.1. Cálculos posteriores al ajuste del Zero PV

Después de ejecutar Zero PV será necesario repetir exactamente los mismos cinco puntos utilizados inicialmente. Esta repetición es indispensable porque un ajuste no debe evaluarse únicamente comprobando que el punto corregido muestra cero, debe observarse nuevamente la respuesta del transmisor en todo el rango experimental.

Se comenzará nuevamente con aproximadamente $100\ \Omega$ y se registrarán (R_{real}), (T_{ref}), (PV_{HART}) y (AO_{HART}). Posteriormente se aplicarán de manera ascendente las resistencias correspondientes a 25, 50, 75 y $100\ ^\circ\text{C}$. En cada punto se calculará nuevamente el error de PV mediante la ecuación 4.8.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de resultados se desarrolló a partir del procedimiento experimental establecido para evaluar el comportamiento del transmisor de temperatura compatible con protocolo HART. Debido a que durante el ensayo no se utilizó una Pt100 física sometida a una temperatura controlada, la variable de entrada fue generada mediante un potenciómetro de precisión, utilizado como simulador resistivo. De esta manera, se reprodujeron diferentes valores de resistencia equivalentes a los que presentaría una Pt100 dentro del intervalo de trabajo comprendido entre $0\ ^\circ\text{C}$ y $100\ ^\circ\text{C}$.

El procedimiento se dividió en dos condiciones. La primera correspondió al estado inicial del transmisor, antes de efectuar cualquier ajuste mediante el comunicador HART 475 OEM. Posteriormente se realizó el ajuste Zero PV con la entrada situada en el punto correspondiente a $0\ ^\circ\text{C}$ y se repitieron los cinco puntos. Esta segunda condición permitió establecer cuantitativamente el efecto producido por el ajuste de cero.

5.1. DETERMINACIÓN DE VALORES TEÓRICOS

5.1.1. Valores de resistencia

Como primera etapa del análisis se determinaron las resistencias nominales que debían reproducir el potenciómetro para cada uno de los cinco puntos. Para temperaturas comprendidas entre $0\ ^\circ\text{C}$ y $100\ ^\circ\text{C}$ se empleó la relación resistencia–temperatura correspondiente a una Pt100.

Ecuación 4.1:

Al aplicar la ecuación en los cinco puntos, se obtiene lo siguientes datos:

En 0 °C

$$R_T = 100 \, \Omega [1 + (3.9083 * 10^{-3})(0 \, ^\circ\text{C}) + (-5.7750 * 10^{-7})(0 \, ^\circ\text{C})^2] = 100.00 \, \Omega$$

En 25 °C

$$R_T = 100 \, \Omega [1 + (3.9083 * 10^{-3})(25 \, ^\circ\text{C}) + (-5.7750 * 10^{-7})(25 \, ^\circ\text{C})^2] = 109.74 \, \Omega$$

En 50 °C

$$R_T = 100 \, \Omega [1 + (3.9083 * 10^{-3})(50 \, ^\circ\text{C}) + (-5.7750 * 10^{-7})(50 \, ^\circ\text{C})^2] = 119.40 \, \Omega$$

En 75 °C

$$R_T = 100 \, \Omega [1 + (3.9083 * 10^{-3})(75 \, ^\circ\text{C}) + (-5.7750 * 10^{-7})(75 \, ^\circ\text{C})^2] = 128.99 \, \Omega$$

En 100 °C

$$R_T = 100 \, \Omega [1 + (3.9083 * 10^{-3})(100 \, ^\circ\text{C}) + (-5.7750 * 10^{-7})(100 \, ^\circ\text{C})^2] = 138.51 \, \Omega$$

La utilización de esta relación se relacionó directamente con IEC 60751:2022, debido a que dicha norma establece la relación resistencia–temperatura para sensores industriales de platino.

5.1.2. Cálculo de la corriente teórica

La salida analógica AO fue analizada como una variable de comprobación y no como la variable principal de ajuste. Debido a que el transmisor se encontró configurado para transformar el rango de 0 °C a 100 °C en una salida de 4 mA a 20 mA, se determina la corriente teórica correspondiente a cada temperatura mediante la ecuación 4.7.

Para los cinco puntos:

En 0 °C

$$I_{teo} = 4 + 0.16(0 \, ^\circ\text{C}) = 4 \, \text{mA}$$

En 25 °C

$$I_{teo} = 4 + 0.16(25 \, ^\circ\text{C}) = 8 \, \text{mA}$$

En 50 °C

$$I_{teo} = 4 + 0.16(50 \, ^\circ\text{C}) = 12 \, \text{mA}$$

En 75 °C

$$I_{teo} = 4 + 0.16(75 \, ^\circ\text{C}) = 16 \, \text{mA}$$

En 100 °C

$$I_{teo} = 4 + 0.16(100\text{ }^{\circ}\text{C}) = 20\text{ mA}$$

En la Tabla 5.1 se visualiza los datos obtenidos de los valores teóricos.

Tabla 5.1. Valores nominales de R(Ω) y I(mA).

Punto	Temperatura nominal (°C)	Resistencia teórica (Ω)	Corriente teórica (mA)
0%	0	100	4.00
25%	25	109.74	8.00
50%	50	119.40	12.00
75%	75	128.99	16.00
100%	100	138.51	20.00

Los resultados mostrados en la Tabla 5.1 constituyen valores nominales utilizados para ajustar aproximadamente el potenciómetro. Sin embargo, estos valores no se considerarán automáticamente como la resistencia real aplicada al transmisor. Para cada punto se verificó la resistencia mediante el multímetro digital y se registró el valor realmente obtenido. Esta consideración fue necesaria debido a que el potenciómetro presenta una resolución física determinada y, por consiguiente, no siempre resulta posible establecer exactamente el valor nominal calculado.

5.2. PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Para cada punto, se ajustó el potenciómetro hasta alcanzar la resistencia correspondiente y se verificó la resistencia antes de volver a conectar el elemento al transmisor.

La secuencia seguida fue la siguiente:

1. Establecer el valor de resistencia.
2. Verificar la resistencia con el multímetro.
3. Conectar el simulador resistivo al transmisor.
4. Encender el sistema.
5. Esperar a que la lectura se estabilizara.
6. Registrar el PV indicado mediante HART.
7. Registrar el AO indicado mediante HART.
8. Medir la corriente física del bucle.
9. Almacenar los resultados.
10. Repetir el procedimiento para el siguiente punto.

Se utilizó el mismo procedimiento para los cinco puntos.

5.3. DATOS ANTES DEL AJUSTE DE ZERO PV

Una vez calculados los valores nominales, se organizaron las mediciones correspondientes a la condición inicial del transmisor. Para cada uno de los cinco puntos se registró la resistencia real ajustada mediante el potenciómetro, la temperatura equivalente calculada, el valor de PV y AO indicado mediante el comunicador HART y la corriente medida mediante el multímetro. Ver la guía de uso del comunicador HART 475 OEM en el literal 4.5.1.

5.3.1. Cálculo de temperatura equivalente a la resistencia real antes del ajuste

La resistencia realmente medida se denomina (R_{real}). A partir de ella se calculó posteriormente la temperatura equivalente de referencia mediante la expresión inversa, ecuación 4.4.

Este procedimiento permitió evitar que pequeñas diferencias en el ajuste manual del potenciómetro fueran atribuidas incorrectamente al transmisor.

Para 100.50Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{100.50 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 1.28 ^\circ C$$

Para 109.96Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{109.96 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 25.58 ^\circ C$$

Para 119.64Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{119.64 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 50.43 ^\circ C$$

Para 129.15 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{129.15 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 75.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para 138.64 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{138.64 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 100.36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5.3.2. Error en PV antes del ajuste

El parámetro principal utilizado para evaluar el transmisor fue el error de medición de la variable primaria PV. El JCGM 200:2012, correspondiente al Vocabulario Internacional de Metrología, define el error de medición como la diferencia entre el valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Por esta razón, para cada punto se calculó mediante la ecuación 4.8:

En 1.42 $^{\circ}\text{C}$

$$e_{PV} = 1.42 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1.28 \text{ }^{\circ}\text{C} = +0.14 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 25.58 $^{\circ}\text{C}$

$$e_{PV} = 25.72 \text{ }^{\circ}\text{C} - 25.58 \text{ }^{\circ}\text{C} = +0.14 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 50.63 $^{\circ}\text{C}$

$$e_{PV} = 50.89 \text{ }^{\circ}\text{C} - 50.63 \text{ }^{\circ}\text{C} = +0.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 75.43 $^{\circ}\text{C}$

$$e_{PV} = 75.72 \text{ }^{\circ}\text{C} - 75.43 \text{ }^{\circ}\text{C} = +0.29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 100.36 $^{\circ}\text{C}$

$$e_{PV} = 100.57 \text{ }^{\circ}\text{C} - 100.36 \text{ }^{\circ}\text{C} = +0.21 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En la Tabla 5.2 se aprecia los valores que se obtuvieron mediante cálculos y el comunicador HART, la pantalla del comunicador HART mostrando las variables PV y AO se visualiza en el anexo 2, así como también se visualiza el árbol de instrucciones del comunicador HART.

Tabla 5.2. Resultados experimentales antes del ajuste Zero PV.

Punto	R_real (Ω)	T_ref ($^{\circ}\text{C}$)	PV_HART ($^{\circ}\text{C}$)	e_PV ($^{\circ}\text{C}$)	AO_HART (mA)
0%	100.50	1.28	1.42	+0.14	4.23
25%	109.96	25.58	25.72	+0.14	8.13
50%	119.64	50.63	50.89	+0.26	12.14
75%	129.15	75.43	75.72	+0.29	16.11
100%	138.64	100.36	100.57	+0.21	20.09

Los valores experimentales registrados en la Tabla 5.2 permitieron establecer la condición inicial del transmisor. En esta etapa no se realizó ninguna corrección matemática sobre las lecturas del transmisor, debido a que el propósito fue conocer el error existente antes de utilizar la función Zero PV.

5.4. DATOS DESPUÉS DEL AJUSTE DE ZERO PV

Una vez concluida la evaluación inicial se volvió el simulador resistivo al punto correspondiente al límite inferior del rango. Después de comprobar la resistencia equivalente al punto de 0 $^{\circ}\text{C}$ se ejecutó la función Zero PV mediante el comunicador HART 475 OEM.

Esta operación se interpretó como un ajuste de cero. El JCGM 200:2012 establece que el ajuste de cero tiene como objetivo lograr que el sistema de medición proporcione una indicación nula cuando se aplica una magnitud cuyo valor es cero. El mismo documento diferenciadamente claro entre ajuste y calibración, por lo que después de ejecutar Zero PV se repitió la serie completa de mediciones.

5.4.1. Cálculo de temperatura equivalente a la resistencia real después del ajuste

La resistencia realmente medida se denomina (R_real). A partir de ella se calculó posteriormente la temperatura equivalente de referencia mediante la expresión inversa, ecuación 4.4:

Para 100.43 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{100.43 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 1.10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para 109.78 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{109.78 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 25.11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para 119.52 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{119.52 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 50.32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para 129.11 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{129.11 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 75.32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para 138.57 Ω

$$T_{ref} = \frac{-(3.9083 * 10^{-3}) + \sqrt{(3.9083 * 10^{-3})^2 - 4(-5.7750 * 10^{-7})(1 - \frac{138.57 \Omega}{100 \Omega})}}{2(-5.7750 * 10^{-7})}$$

$$T_{ref} = 100.17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.4.2. Error en PV después del ajuste

El JCGM 200:2012, correspondiente al Vocabulario Internacional de Metrología, define el error de medición como la diferencia entre el valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Por esta razón, para cada punto se calculó mediante la ecuación 4.8:

En 1.42 °C

$$e_{PV} = 1.12\text{ }^{\circ}\text{C} - 1.10\text{ }^{\circ}\text{C} = +0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 25.58 °C

$$e_{PV} = 25.12\text{ }^{\circ}\text{C} - 25.11\text{ }^{\circ}\text{C} = +0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 50.63 °C

$$e_{PV} = 50.34\text{ }^{\circ}\text{C} - 50.32\text{ }^{\circ}\text{C} = +0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 75.43 °C

$$e_{PV} = 75.33\text{ }^{\circ}\text{C} - 75.32\text{ }^{\circ}\text{C} = +0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$$

En 100.36 °C

$$e_{PV} = 100.19\text{ }^{\circ}\text{C} - 100.17\text{ }^{\circ}\text{C} = +0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$$

En la Tabla 5.3 se aprecia los valores que se obtuvieron mediante cálculos y el comunicador HART, la pantalla del comunicador HART mostrando las variables PV y AO.

Tabla 5.3. Resultados experimentales después del ajuste Zero PV.

Punto	R_real (Ω)	T_ref (°C)	PV_HART (°C)	e_PV (°C)	AO_HART (mA)
0%	100.43	1.10	1.12	+0.02	4.18
25%	109.78	25.11	25.12	+0.01	8.02
50%	119.52	50.32	50.34	+0.02	12.05
75%	129.11	75.32	75.33	+0.01	16.05
100%	138.57	100.17	100.19	+0.02	20.03

La Tabla 5.3 muestra los valores que se obtuvieron luego de realizar el ajuste Zero PV con el comunicador HART 475 OEM.

5.5. GRÁFICA DE RESPUESTA DE PV ANTES Y DESPUÉS DEL AJUSTE

En la Tabla 5.4 se visualiza los datos de PV antes y después del ajuste, y se separan sus valores debido a que no tienen el mismo valor de resistencia, por ende, no se obtendrá la misma gráfica para cada una de ellas y se deben graficar por separado.

Tabla 5.4. Datos de PV antes y después del ajuste

Punto	PV_HART antes (°C)	T_ref antes (°C)	PV_HART después (°C)	T_ref después (°C)
0%	1.42	1.28	1.12	1.10
25%	25.72	25.58	25.12	25.11
50%	50.89	50.63	50.34	50.32
75%	75.72	75.43	75.33	75.32
100%	100.57	100.36	100.19	100.17

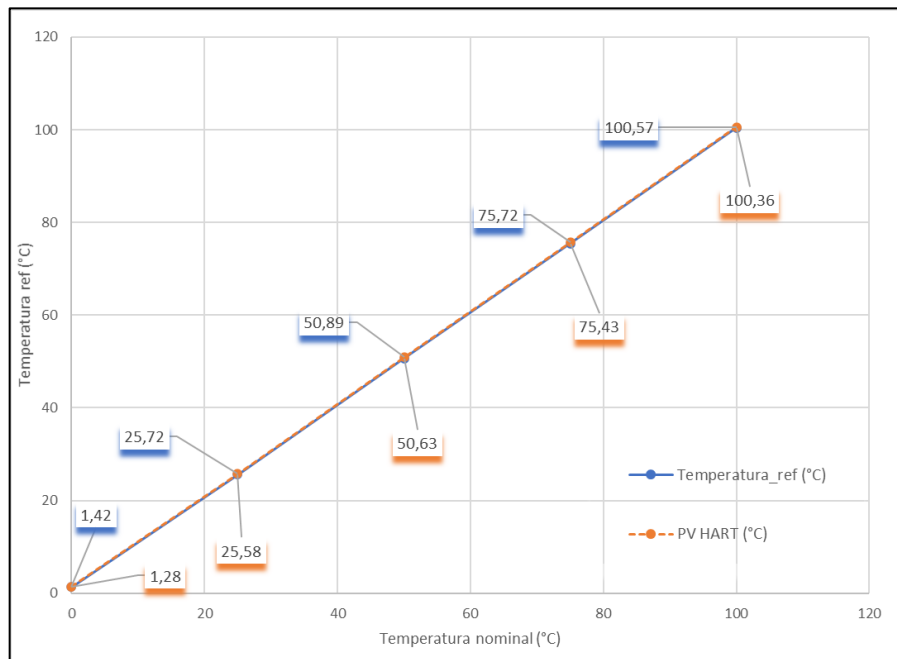


Figura 5.1. Comparación de la respuesta PV antes del ajuste Zero PV.

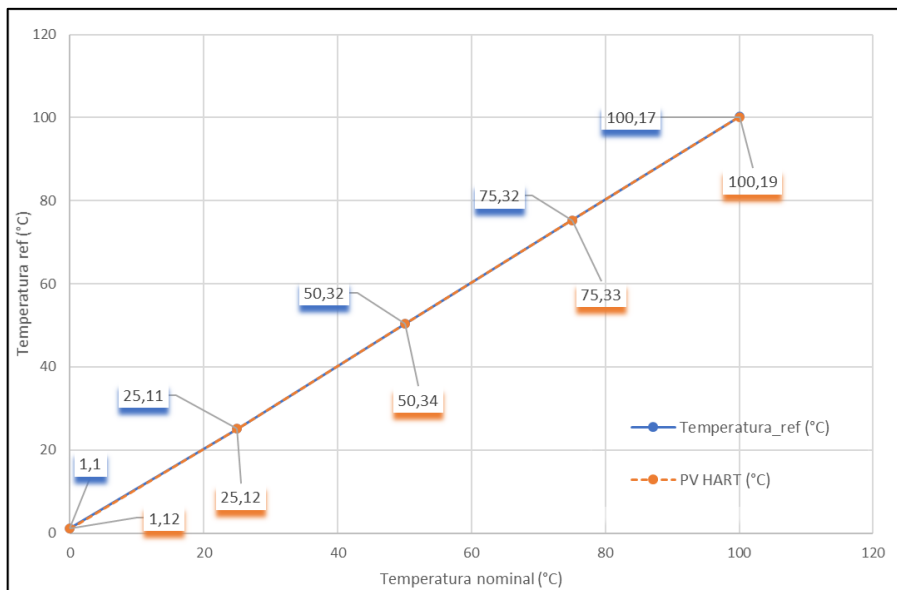


Figura 5.2. Comparación de la respuesta PV después del ajuste Zero PV.

La Figura 5.1 y Figura 5.2 se observa las mediciones obtenidas, la cercanía de las dos curvas no se interpreta como ausencia de error. Debido a que el intervalo vertical comprende aproximadamente 100 °C, las desviaciones de uno o dos grados pueden ser visualmente pequeñas en esta gráfica. Por esta razón, la gráfica deberá complementarse obligatoriamente con el análisis específico del error.

El hecho de que las curvas obtenidas sean prácticamente rectas no representa un problema. El transmisor se encuentra configurado para generar una relación aproximadamente lineal entre la variable de temperatura dentro del rango y su salida asociada. Por tanto, no deberá modificarse artificialmente la escala ni alterar los valores experimentales con el propósito de generar picos. La información sobre las pequeñas diferencias deberá observarse en la gráfica de error.

5.5.1. Gráfica del error de PV antes y después de Zero PV

En la Tabla 5.4 se observa los errores que se obtuvieron mediante los cálculos realizados anteriormente.

Tabla 5.5. Error de PV antes y después del ajuste.

Temperatura nominal (°C)	e_PV antes (°C)	e_PV después (°C)
0	+0.14	+0.02
25	+0.14	+0.01
50	+0.26	+0.02
75	+0.29	+0.01
100	+0.21	+0.02

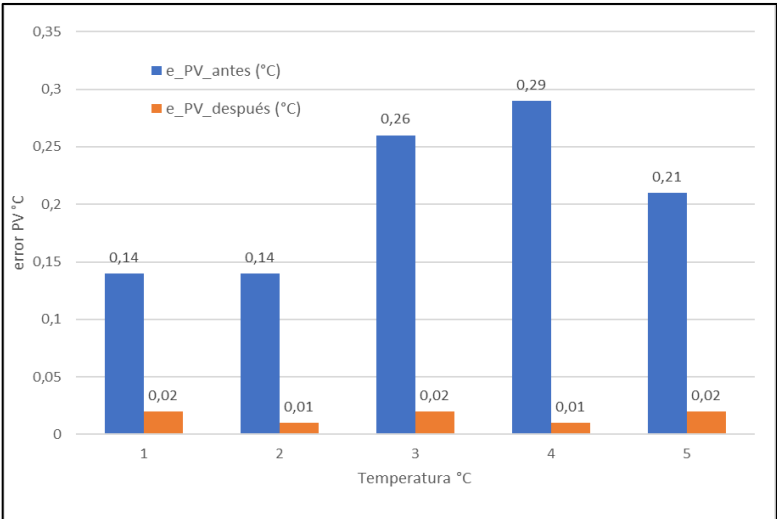


Figura 5.3. Error de PV antes y después del ajuste Zero PV.

En la Figura 5.3 se visualiza que el error antes de la PV era elevado mientras que después de realizar el ajuste mediante el protocolo HART el error disminuyó drásticamente a valores más estables y cerca de lo ideal y dentro del rango de ± 0.1 F.S, la ficha de datos del transmisor se visualiza en el anexo 1.

5.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En las Figuras 5.1 y 5.2 se observa que la respuesta de la variable primaria PV mantiene un comportamiento aproximadamente lineal tanto antes como después del ajuste Zero PV. Debido a que los valores de resistencia aplicados no fueron exactamente los mismos en ambas condiciones, se utilizaron valores de referencia diferentes para cada ensayo y, por esta razón, las curvas fueron representadas por separado. La cercanía entre la curva de referencia y la curva obtenida mediante HART indica que el transmisor presenta una respuesta coherente con el comportamiento esperado; Sin embargo, las pequeñas desviaciones no pueden apreciarse con claridad en estas gráficas debido al rango de 0 a 100 °C, por lo que fue necesario complementar el análisis mediante el cálculo específico del error.

En la Figura 5.3 se evidencia con mayor claridad el efecto del ajuste Zero PV. Antes del ajuste, los errores obtenidos fueron positivos en los cinco puntos evaluados y se encontraron entre +0.14 °C y +0.29 °C, lo que indica que el transmisor presentaba una tendencia a indicar valores ligeramente superiores a la referencia. El mayor error se presentó en el punto de 75 °C, con una desviación de +0.29 °C. Estos resultados superaban el límite de exactitud de ± 0.1 % F.S. establecida en la ficha técnica del transmisor para el rango considerado.

Después de aplicar el ajuste Zero PV mediante el comunicador HART, los errores disminuirán considerablemente y se ubicarán entre +0.01 °C y +0.02 °C. Esto demuestra que el ajuste permitió reducir de manera significativa la desviación existente en la variable PV y mantener los cinco puntos dentro del límite de exactitud especificado por el fabricante. Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten concluir que la aplicación del protocolo HART, mediante la función Zero PV disponible en el transmisor, mejoró notable la correspondencia entre la temperatura de referencia generada mediante el simulador resistivo y la temperatura indicada por el transmisor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que la aplicación de un procedimiento técnico mediante protocolo HART permitió no solamente acceder a la información interna del transmisor, sino también diagnosticar el error, seleccionar el ajuste disponible y comprobar cuantitativamente su efecto. Por tanto, el aporte principal del trabajo no consiste en considerar a HART como un elemento que realiza automáticamente la calibración, sino en establecer un procedimiento estructurado de verificación, diagnóstico, ajuste y comprobación posterior, que permite tomar una decisión técnica sobre la etapa que requiere intervención.
- Se fundamentó el procedimiento técnico para la evaluación del transmisor de temperatura mediante la integración de criterios normativos, metrológicos y de comunicación industrial. La IEC 60751:2022 permitió establecer la relación resistencia–temperatura correspondiente a la Pt100; la IEC 60381-1 sustentaba el empleo de la señal analógica de 4–20 mA; y el JCGM 200:2012 (VIM) permitió diferenciar los conceptos de calibración, verificación y ajuste, además de establecer el error de medición como la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia. Complementariamente, la documentación de Emerson y FieldComm Group permitió establecer las condiciones de comunicación HART y la utilización de una resistencia de carga de 250 Ω .
- La ejecución del procedimiento experimental en cinco puntos distribuidos al 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del rango de 0 a 100 °C permitió diagnosticar el comportamiento inicial del transmisor utilizando un potenciómetro de precisión como simulador resistivo de una Pt100. Antes del ajuste, los errores de la variable primaria fueron de +0.14 °C, +0.14 °C, +0.26 °C, +0.29 °C y +0.21 °C, respectivamente, evidenciándose una desviación positiva en todo el intervalo y alcanzándose el mayor error en el punto correspondiente al 75 % del rango. La comparación entre la temperatura equivalente de referencia y el PV obtenido mediante HART permitió determinar que la corrección debía realizarse sobre la variable primaria, por lo que se aplicó la función Zero PV disponible en el transmisor, sin modificar el LRV, URV ni efectuar un ajuste de la salida analógica.

- La comparación de los resultados antes y después de la aplicación del procedimiento demostró una mejora significativa en el comportamiento del transmisor. Después del ajuste Zero PV, los errores de PV disminuyeron a +0.02 °C, +0.01 °C, +0.02 °C, +0.01 °C y +0.02 °C en los cinco puntos evaluados. Para el rango configurado de 0 a 100 °C, los resultados posteriores se mantuvieron dentro del límite de $\pm 0,1$ % del fondo de escala, equivalente a $\pm 0,1$ °C, considerado en la documentación técnica del transmisor. Asimismo, los valores de AO reportados mediante HART mantuvieron correspondencia con el comportamiento esperado de la señal de 4–20 mA.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, en futuros trabajos que se basen en la calibración de transmisores inteligentes se extienda el análisis utilizando diversos modelos y marcas de transmisores de temperatura, con la finalidad de comparar su comportamiento y determinar si las mejoras se mantienen en diferentes condiciones de operación.
- Se recomienda utilizar equipos de instrumentación que sean compatibles con la comunicación HART, asegurando el correcto funcionamiento del transmisor junto al comunicador, asimismo se sugiere emplear una resistencia de 250 Ω que permita establecer una comunicación estable.
- Para investigaciones posteriores y más profundas del tema se sugiere realizar pruebas en ambientes industriales reales, donde considerando factores externos ver como existen variaciones por ruido en la señal, en la alimentación eléctrica, condiciones ambientales y perturbaciones ya que el presente estudio fue desarrollado bajo condiciones controladas.
- Se sugiere desarrollar investigaciones que comparen la aplicación del protocolo HART con otros métodos que existan acerca de la calibración o tecnologías de comunicación industrial, con el fin de establecer ventajas, limitaciones y criterios técnicos donde se permita seleccionar el procedimiento óptimo para cada escenario.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO, «Códigos UNESCO: Nomenclatura internacional de UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología», UNESCO, Nomenclatura/Clasificación.
- [2] T. R. Padmanabhan, *Industrial Instrumentation*. London, UK: Springer London, 2000. doi: 10.1007/978-1-4471-0451-3.
- [3] J. Love, *Process Automation Handbook*. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-282-9.
- [4] M. A. P. Pertijs, G. C. M. Meijer, y J. H. Huijsing, «Precision Temperature Measurement Using CMOS Substrate PNP Transistors», *IEEE Sens. J.*, vol. 4, n.º 3, pp. 294-300, jun. 2004, doi: 10.1109/JSEN.2004.826742.
- [5] G. C. M. Meijer, Guijie Wang, y F. Fruett, «Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology», *IEEE Sens. J.*, vol. 1, n.º 3, pp. 225-234, 2001, doi: 10.1109/JSEN.2001.954835.
- [6] M. Orzylowski, M. Hering, T. Kaluzniacki, W. Lobodzinski, P. Ostrowski, y J. Wiechowski, «Automated calibration of temperature sensors», en *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*, Baltimore, MD, USA: IEEE, 2000, pp. 285-289. doi: 10.1109/IMTC.2000.846869.
- [7] M. A. P. Pertijs, A. L. Aita, K. A. A. Makinwa, y J. H. Huijsing, «Voltage calibration of smart temperature sensors», en *2008 IEEE Sensors*, Lecce, Italy: IEEE, oct. 2008, pp. 756-759. doi: 10.1109/ICSENS.2008.4716551.
- [8] M. A. P. Pertijs, A. L. Aita, K. A. A. Makinwa, y J. H. Huijsing, «Low-Cost Calibration Techniques for Smart Temperature Sensors», *IEEE Sens. J.*, vol. 10, n.º 6, pp. 1098-1105, jun. 2010, doi: 10.1109/JSEN.2010.2040730.
- [9] A. L. Aita, M. A. P. Pertijs, K. A. A. Makinwa, J. H. Huijsing, y G. C. M. Meijer, «Low-Power CMOS Smart Temperature Sensor With a Batch-Calibrated Inaccuracy of ± 0.25 °C ($\pm 3\sigma$) From -70 °C to 130 °C», *IEEE Sens. J.*, vol. 13, n.º 5, pp. 1840-1848, may 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2244033.
- [10] L. Chang y G. Zhang, «The Design of Intelligent Temperature Transmitter Based on HART Protocol», en *2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, Harbin City, Heilongjiang, China: IEEE, dic. 2012, pp. 1499-1502. doi: 10.1109/IMCCC.2012.351.
- [11] J. M. D. Pereira, O. Postolache, y P. S. Girao, «HART protocol analyser based in LabVIEW», en *Second IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2003. Proceedings*, Lviv, Ukraine: IEEE, 2003, pp. 174-176. doi: 10.1109/IDAACS.2003.1249542.
- [12] G. Wang, Q. Shang, S. Yu, y S. Yang, «Design of PC Communication with HART Field Instrumentation», en *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, Hangzhou, Zhejiang, China: IEEE, mar. 2012, pp. 299-302. doi: 10.1109/ICCSEE.2012.209.
- [13] F. Y. Zulkifli y G. Schneiderheinze, «Generic device description for complex HART field devices», en *The 8th International Conference on Communication Systems, 2002. ICCS 2002.*, Singapore: IEEE, 2002, pp. 646-650. doi: 10.1109/ICCS.2002.1183206.
- [14] K. Dudáček, J. Ledvina, y V. Vavricka, «Development of a HART compatible HART line powered communication module», en *2014 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, Czech Republic: IEEE, sep. 2014, pp. 75-78. doi: 10.1109/AE.2014.7011672.
- [15] D. Paseltiner, S. Payagala, y D. Jarrett, «Design, Construction, and Calibration of a Temperature Monitoring System for Resistance Standards», *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 122, p. 45, dic. 2017, doi: 10.6028/jres.122.045.

- [16] *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*, IEC 60751:2022, 27 de enero de 2022.
- [17] Emerson Electric Co., «Rosemount 3144S Temperature Transmitter: Operation and Maintenance Manual», Emerson Automation Solutions, Shakopee, Minnesota, EE. UU., Rev. AC, dic. 2025.
- [18] FieldComm Group, «HART Technology Explained», FieldComm Group, Austin, Texas, EE. UU., 2026.
- [19] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), «International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)», BIPM, JCGM 200:2012, 2012.
- [20] K. O. Sanchez Silvera y M. J. Goche Infante, «Implementación de un módulo con sistema de periferia descentralizada Hart, para el control de nivel y temperatura en la planta de tanques del Laboratorio de Control de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica», Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna, 2021.
- [21] M. Abotaleb, J. Mindykowski, B. Dudojc, y R. Masnicki, «Case-Study-Based Overview of Methods and Technical Solutions of Analog and Digital Transmission in Measurement and Control Ship Systems», *Sensors*, vol. 22, n.º 18, p. 6931, sep. 2022, doi: 10.3390/s22186931.
- [22] R. T. Wintio, B. W. Dionova, y A. Yusuf, «Validation of Pressure Transmitter Input/Output Loop Testing Based on Hybrid Analog and Digital HART Communication», *Eksergi*, vol. 21, n.º 01, pp. 1-6, ene. 2024, doi: 10.32497/eksergi.v21i01.6358.
- [23] L. M. Pullotasig Lema y J. S. Toaquiza Chimba, «Aplicación del protocolo HART en el proceso de calibración de transmisores de presión», Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: (UTC), 2026.
- [24] K. Lv, «Implementation of an Ultra-Low-Power Temperature and Pressure Detection System Based on the HART Protocol», *Int. J. Sci. Eng. Appl.*, abr. 2026, doi: 10.7753/IJSEA1504.1011.
- [25] WIKA, «Electrical Temperature Measuring Instruments», WIKA USA, Folleto, mar. 2024.
- [26] «The International System of Units (SI): SI Brochure», 2019. doi: 10.59161/AUEZ1291.
- [27] International Electrotechnical Commission, «Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances», International Electrotechnical Commission, IEC 60584-1:2013, 2013.
- [28] Exida, «Results of the IEC 61508 Functional Safety Assessment», Exida, Shakopee, Minnesota, EE. UU., ROS 16-12-041 R002, may 2022.
- [29] Emerson, «Rosemount 248 Temperature Transmitter», Emerson, Reference Manual 00809-0100-4825, abr. 2023.
- [30] International Electrotechnical Commission, «Analogue signals for process control systems - Part 1: Direct current signals», International Electrotechnical Commission, IEC 60381-1:1982, ene. 1982.
- [31] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), «Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment», BIPM, JCGM 106:2012, oct. 2012. doi: 10.59161/JCGM106-2012.
- [32] FieldComm Group, «HART Application Guide», FieldComm Group, Austin, TX 78759, USA, HCF_LIT-039 Rev. 7.1, sep. 2013.
- [33] Emerson, «Rosemount 3144P Temperature Transmitter», Emerson Automation Solutions, Product Data Sheet 00813-0100-4021, feb. 2026.

8. ANEXOS

ANEXO 1. Ficha de datos de los elementos utilizados

Ficha de datos del transmisor de temperatura + HART

Información Básica			
No. de Modelo.	H648WD	Tipo de pantalla	no
Pantalla del sitio	No Sitio Display	Exactitud	0,1
Certificación	pce	Personalizado	Personalizado
fuelle de alimentación	12-32vdc	salida	4-20ma con hart (2 hilos)
color	azul	se utiliza para	rtd, tc, ohm, mv
uso	industrial	temperatura de funcionamiento	-40deg;c ~ +85deg;c
garantía	1 años	peso	about35g
Paquete de Transporte	cartón de papel y como requisito del comprador	Especificación	sgs
Marca Comercial	bjzrzc	Origen	Beijing China
Código del HS	902690000	Capacidad de Producción	10000 unidades/mes

Multímetro digital Fluke 87V MAX True-rms

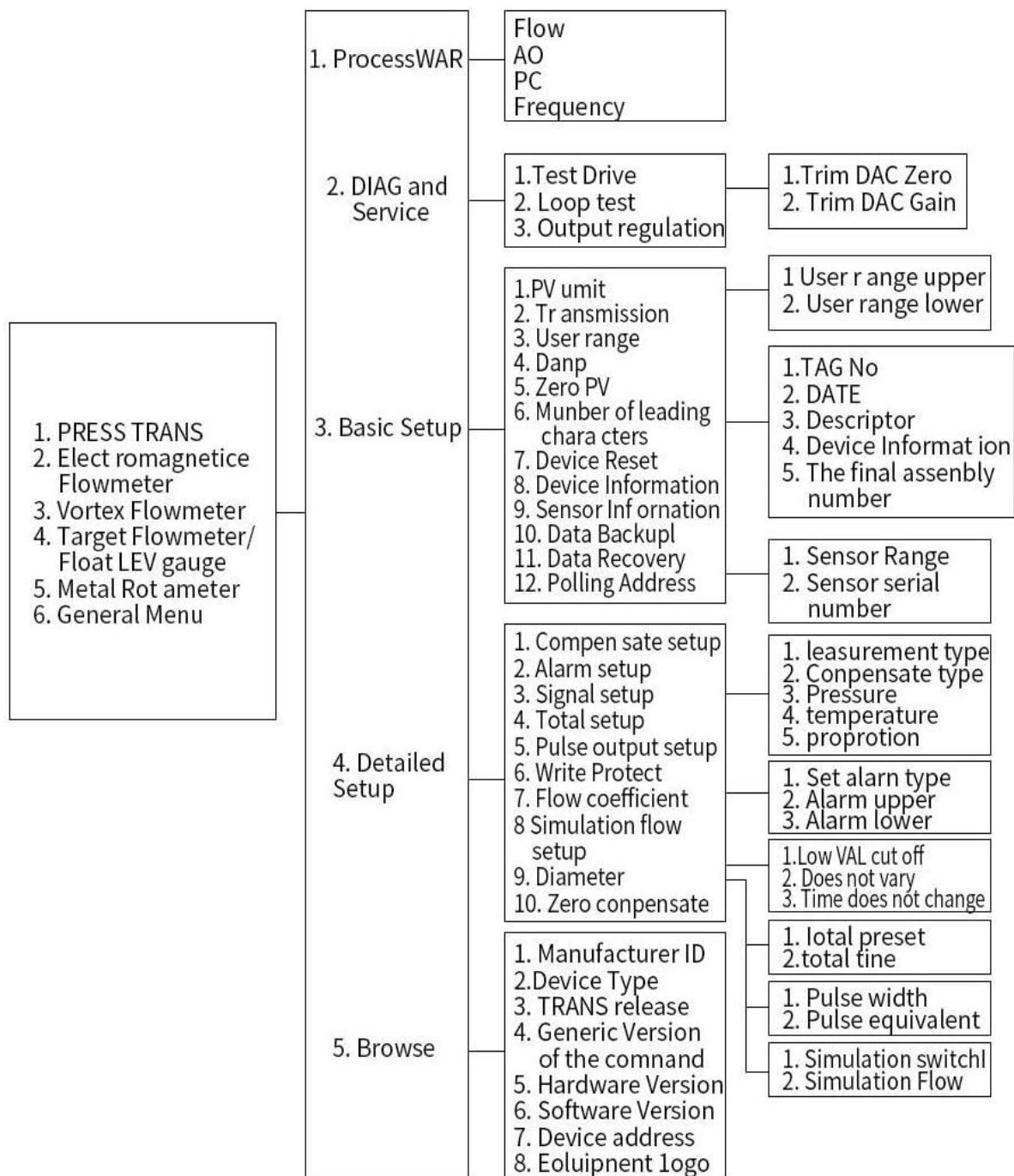
Specifications

Accuracy		
DC voltage	Max. resolution Accuracy	0.1 mV to 1000 V 0.05 % + 1
AC voltage	Max. resolution Accuracy	0.1 mV to 1000 V 0.7 % + 4
DC current	Max. resolution Accuracy	0.1 µA to 10 A 0.2 % + 2
AC current	Max. resolution Accuracy	0.1 µA to 10 A 1.0 % + 2
Resistance	Max. resolution	0.1 Ω to 50 MΩ
Display counts	6,000/19,999	
Capacitance	0.01 nF to 9999 µF	
Frequency	0.5 Hz to 199.99 kHz	
Temperature	-200 °C to +1090 °C	
Low pass filter (Measurement on VFDs)	Yes	
Safety rating	CAT IV 600 V, CAT III 1000V	
IP rating	IP 67	
Power	Three AA batteries	
Battery life	800 hours	
Display		
Bar graph/backlight	Yes/Yes	
Data storage		
Peak transient capture	250 µs	
Min/Max/Avg	Yes	
Reading hold	Yes	
Other features		
Relative readings (zero)	Yes	
Battery type	Three AA batteries	
Warranty and protection		
Safety rating	CAT IV 600 V/CAT III 1000 V	
External protection	Rubber holster	
Drop test	4 meter (13 feet) drop test	
Dustproof/waterproof	Yes, IP 67 rated	
Warranty	Limited lifetime	
Size (HxWxL) with holster	6.0 cm x 10.1 cm x 21.5 cm (2.4 in x 4.3 in x 8.5 in)	
Weight with holster	698.5 g (1.54 lb)	

ANEXO 2. Comunicador HART 475 OEM

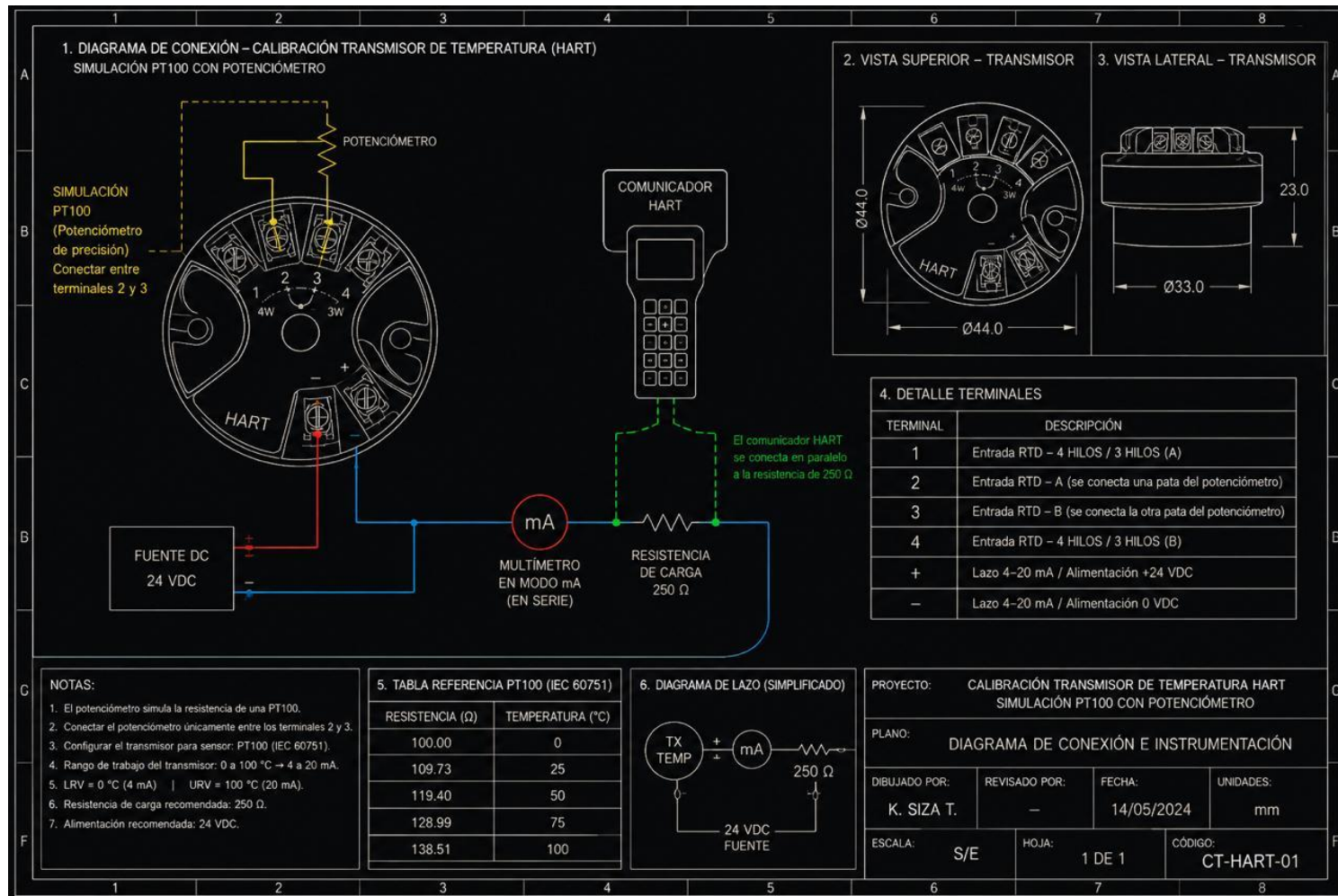


Se visualiza el comunicador HART y multímetro digital en muestra de sus variables para la toma de datos, aquí se realizaron varias mediciones en base a la resistencia generada por el potenciómetro de precisión.



Se ilustra el árbol de instrucciones y la estructura de navegación del comunicador de campo HART 475 OEM, detallando la secuencia lógica de menús utilizados para la interacción con el transmisor. A través de este esquema se sintetizan las rutas de acceso a los comandos universales, facilitando la localización de parámetros clave como la lectura de variables de proceso, la configuración de rangos operacionales (LRV y URV) y la ejecución de rutinas de diagnóstico y calibración.

ANEXO 3. Plano del cableado diseñado en el Software Autocad.



Se visualiza el plano en Autocad de las conexiones y especificaciones del montaje experimental que se realizó para la calibración del transmisor de temperatura.