



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 PRESIÓN**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTORES:

Luis Miguel Pullozasig Lema
Jhonatan Saul Toaquiza Chimba

TUTOR:

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C.


**LATACUNGA – ECUADOR
2025-2026**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Pullotasig Lema Luis Miguel con cedula de ciudadanía No. 0503977977 y Toaquiza Chimba Jhonatan Saul con cedula de ciudadanía No. 0504443342, declaramos ser autores del proyecto de titulación “**APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES**”, siendo el Ing. MSc. Luigi Orlando Freire Martínez, Tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

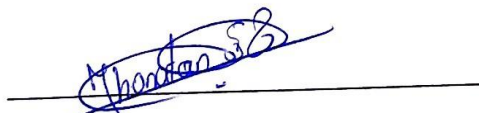
Latacunga, marzo 2026



Pullotasig Lema Luis Miguel

C.C: 0503977977

AUTOR 1



Toaquiza Chimba Jhonatan Saul

C.C: 0504443342


AUTOR 2

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 PRESIÓN”, de Pullo Lasig Lema Luis Miguel y Toaquiza Chimba Jhonatan Saul de la Carrera de Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.

Latacunga, marzo 2026



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

AVAL DE MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Pullozasig Lema Luis Miguel y Toaquiza Chimba Jhonatan Saul, con el título de Proyecto de titulación: **“APLICACIÓN DEL PROTOCOLO HART EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES DE PRESIÓN”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.


Latacunga, Marzo del 2026



Ing. Porras Reyes Jefferson Alberto
C.C: 0704400449
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Morgano Martínez Edwin Homero Ms.C
C.C: 0502607500
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Pacheco Mena Carlos Francisco Ms.C
C.C: 0503072902
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi por 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 a lo largo de mi formación compartieron sus conocimientos, experiencias y valores profesionales, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

Un reconocimiento especial a mi tutor de tesis, por su orientación, acompañamiento y valiosos aportes 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.

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

Luis Miguel

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme guiado en cada paso de este camino, por darme la capacidad, la paciencia y la perseverancia para superar cada desafío.

A mis padres y hermanos, gracias por su confianza en mí y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con trabajo y determinación

Expreso mis agradecimientos a la Universidad y a los docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación académica compartieron sus conocimiento, experiencias y orientación profesional, contribuyendo de manera significativa en el desarrollo de mis habilidades y capacidades.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis por su guía, apoyo y recomendaciones durante el desarrollo de este proyecto de investigación. Sus observaciones y conocimiento fueron fundamental para la correcta elaboración de este trabajo.

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

Jhonatan Saul

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta etapa tan importante de mi vida académica, y por guiar cada uno de mis pasos hasta alcanzar la meta de graduarme como ingeniero electromecánico.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y sacrificio a lo largo de este camino, quienes han sido el pilar fundamental en los momentos más difíciles y la motivación constante para no rendirme.

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

Este logro también es de ustedes.

Luis Miguel

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por haberme dado la vida, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa importante de mi formación Profesional.

A mis padres quienes con esfuerzo, apoyo incondicional y consejos han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por creer en mí por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos difíciles y por enseñarme que el trabajo constante es la base para alcanzar los objetivos.

A mi familia, por su comprensión, paciencia y palabras de ánimo durante todo este proceso académico. Su apoyo ha sido fundamental para mantener la motivación y la perseverancia hasta alcanzar esta meta.

Con eterna gratitud, para ustedes, papá, mamá, hermanos, este logro es en su honor.

Jhonatan Saul

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 PRESIÓN”

Autores:

Pullotasig Lema Luis Miguel
Toaquiza Chimba Jhonatan Saul

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló y evaluó un procedimiento de calibración aplicado a un transmisor de presión industrial mediante el protocolo de comunicación HART, con el propósito de reducir el error de medición y mejorar la confiabilidad del instrumento. La problemática se originó debido a que en entornos industriales los procesos de calibración se realizan únicamente mediante la verificación de la señal analógica de 4–20 mA, lo cual limita la detección de errores asociados a las etapas internas del transmisor.

Durante la operación continua de los instrumentos de medición pueden presentarse desviaciones provocadas por desgaste mecánico del sensor, variaciones térmicas, pérdidas de linealidad o desplazamientos en el ajuste del rango, lo que ocasiona errores progresivos en la medición de la variable de presión. Estas condiciones pueden afectar la confiabilidad del sistema de control y generar decisiones operativas incorrectas en los procesos industriales.

Para evaluar el comportamiento del transmisor se realizaron pruebas de verificación distribuidas en cinco puntos del rango de medición: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, los cuales corresponden a prácticas recomendadas en procedimientos de calibración de instrumentación industrial, ya que permiten analizar el comportamiento del instrumento en todo su rango operativo y detectar errores de linealidad, histéresis y desplazamiento del punto cero.

Los resultados evidenciaron que, antes de realizar el ajuste mediante protocolo HART, el transmisor presentaba desviaciones progresivas en la señal de salida, alcanzando errores cercanos al 5 % del fondo de escala. Posteriormente, mediante la aplicación de ajustes de Zero Trim y Span Trim, se logró reducir el error de medición a valores inferiores al 0.2 %, lo que representa una mejora significativa en la precisión del instrumento.

Se concluyó que la aplicación del protocolo HART en los procedimientos de calibración permite acceder a los parámetros internos del transmisor, facilitando el diagnóstico de errores y mejorando la exactitud del sistema de medición de presión.

Palabras claves: Protocolo HART, Calibración industrial, Transmisor de presión, señal 4-20 mA, Error de medición, Comunicación digital.

Technical University of Cotopaxi

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: “APPLICATION OF THE HART PROTOCOL IN THE CALIBRATION
PROCESS OF PRESSURE TRANSMITTERS”**

Authors:

Pullotasig Lema Luis Miguel
Toaquiza Chimba Jhonatan Saul

ABSTRACT

In this project, a calibration procedure applied to industrial pressure transmitters using the HART communication protocol was developed and evaluated in order to reduce measurement error and improve the reliability of the instrument. The problem arises because in many industrial environments calibration processes are carried out only by verifying the analog signal of 4–20 mA, which limits the detection of errors associated with the internal stages of the transmitter.

During the continuous operation of measuring instruments, deviations may occur due to mechanical wear of the sensor, temperature variations, loss of linearity, or shifts in the zero and span adjustments. These conditions can generate progressive errors in pressure measurement, affecting the reliability of the control system and potentially leading to incorrect operational decisions in industrial processes.

To evaluate the behavior of the transmitter, verification tests were performed at five points distributed across the measurement range: 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. These points correspond to recommended practices in industrial instrumentation calibration procedures, since they allow the analysis of the instrument's performance throughout its operating range and help detect errors related to linearity, hysteresis, and zero shift.

The results showed that, before applying the adjustment using the HART protocol, the transmitter presented progressive deviations in the output signal, reaching errors close to 5% of the full scale. After applying the Zero Trim and Span Trim adjustments, the measurement error was reduced to values below 0.2%, which represents an improvement in the accuracy of the instrument.

It can be concluded that the use of the HART protocol in calibration procedures allows access to the internal parameters of the transmitter, facilitating error diagnosis and improving the accuracy of the pressure measurement system.

Keywords: HART protocol, Industrial calibration, Pressure transmitter, 4-20 mA signal, Measurement error, Digital communication.

ÍNDICE

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	3
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.3.1. Objeto de investigación	4
2.3.2. Campo de acción: 3310 Tecnología Industrial	4
2.4. BENEFICIARIOS	4
2.4.1. Directo	4
2.4.2. Indirecto	4
2.5. JUSTIFICACIÓN	4
2.6. OBJETIVOS	6
2.6.1. General	6
2.6.2. Específicos	6
2.6.3. Sistema de tareas	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1. ANTECEDENTES	7
3.2. PROCESO INDUSTRIAL	8
3.2.1. Proceso continuo	9
3.3. SISTEMA DE REGULACION O CONTROL	9
3.3.1. Control automático	9
3.3.2. Sistema de control en lazo abierto	10
3.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado	10
3.4. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL	11
3.4.1. Transmisores de presión	11

3.5.	PROCESOS INTERNOS DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN.....	13
3.5.1.	Conversión Analógico-Digital (A/D)	13
3.5.2.	Procesamiento digital de la señal	13
3.5.3.	Conversión Digital-Analógica (D/A)	14
3.6.	CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS	14
3.6.1.	Calibración y ajuste de rango	14
3.6.2.	Ajuste de Zero y de Span (Instrumentos analógicos).....	14
3.6.3.	Ajuste de Zero y Span instrumentos analógicos.....	15
3.6.4.	Ajustes de LRV y URV, Ajuste digital (Transmisores digitales).....	17
3.6.5.	Ajustes de LRV y URV, Trim Digital (Transmisores digitales).....	18
3.7.	VERIFICACIÓN DEL CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL (A/D) MEDIANTE COMUNICACIÓN HART	18
3.8.	VERIFICACIÓN DEL CONVERTIDOR DIGITAL-ANALÓGICO (D/A) MEDIANTE COMUNICACIÓN HART	19
3.9.	COMUNICACIÓN HART	20
3.9.1.	Principios de comunicación HART	21
3.9.2.	Señal de control 4-20 mA y Protocolo HART.....	21
3.10.	COMUNICADOR HART 475	22
3.10.1.	Calibración mediante protocolo HART	23
3.11.	EQUIPOS AUXILIARES PARA LA CALIBRACIÓN.....	24
3.11.1.	Bomba generadora de presión	24
3.11.2.	Fuentes de alimentación de 24 VDC	24
3.12.	RELACIÓN A LA FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA CON LA INVESTIGACIÓN 24	
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	25
4.1.	Declaración de variables	25
4.1.1.	Variable independiente	25
4.1.2.	Variable dependiente	25

4.2.	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	25
4.3.	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
4.4.	DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	26
4.5.	SISTEMA HIDRÁULICO DE GENERACIÓN DE PRESIÓN	27
4.5.1.	Selección de la bomba	27
4.5.2.	Plano de diseño mecánico del sistema hidráulico	27
4.5.3.	Selección del fluido hidráulico	28
4.6.	PLANO DE DISEÑO ELÉCTRICO DEL LAZO DE CORRIENTE	28
4.6.1.	Configuración general	28
4.6.2.	Especificaciones técnicas de los equipos.....	29
4.7.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	30
4.7.1.	Variables independientes	30
4.7.2.	Variables dependientes	30
4.8.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	30
4.8.1.	Fuente de 24 VDC	34
4.8.2.	Comunicador de campos HART 475.....	34
4.8.3.	Multímetro digital.....	35
4.8.4.	Preparación del sistema	35
4.8.5.	Aplicación de presión	35
4.8.6.	Registro de datos	36
4.9.	MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA	36
4.10.	PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN	36
4.10.1.	Verificación inicial del sistema (As Found).....	37
4.10.2.	Aplicación del proceso físico (transmisor)	37
4.10.3.	Conversión analógica-digital (A/D).....	37
4.10.4.	Procesamiento digital de la señal.....	37
4.10.5.	Conversión digital analógica (D/A).....	38

4.10.6.	Ajuste final del transmisor (As Left)	38
4.11.	MÉTODO DE CÁLCULO.....	38
4.11.1.	Corriente teórica	38
4.11.2.	Error porcentual.....	38
4.12.	REPETIBILIDAD Y ESTABILIDAD	38
4.13.	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EXPERIMENTAL	39
4.14.	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	39
4.15.	SEGURIDAD OPERATIVA	39
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
5.1.	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	40
5.2.	REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	40
5.3.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO INICIAL DEL TRANSMISOR	43
5.4.	DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS	44
5.5.	RESULTADOS DEL ESTADO DEL TRANSMISOR ANTES DEL AJUSTE HART 44	
5.6.	ANÁLISIS GRÁFICO ANTES DEL AJUSTE	45
5.7.	CÁLCULO DE ERROR PORCENTUAL ANTES DEL AJUSTE	45
5.8.	ERROR PORCENTUAL ANTES DEL AJUSTE	47
5.9.	APLICACIONES DE PROCEDIMIENTO HART	47
5.10.	DATOS DESPUÉS DEL AJUSTE HART	48
5.11.	ANÁLISIS GRÁFICO DESPUÉS DEL AJUSTE.....	48
5.12.	ERROR PORCENTUAL DESPUÉS DEL AJUSTE	49
5.13.	ERROR PORCENTUAL DESPUES DEL AJUSTE	50
5.14.	COMPARACIÓN GLOBAL	51
5.15.	VERIFICACIÓN DEL RANGO OPERATIVO DEL TRANSMISOR	51
5.16.	DISCUSIÓN TÉCNICA	52
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53

6.1. CONCLUSIONES	53
6.2. RECOMENDACIONES.....	53
7. REFERENCIAS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema del funcionamiento de un sistema [11].	9
Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto [11].	10
Figura 3.3. Sistema de control lazo cerrado [11].	11
Figura 3.4. Procesos internos del transmisor de presión [14].	12
Figura 3.5. Funcionamiento parte interna del Transmisor [13].	12
Figura 3.6. Diagrama de funcionamiento interno de un transmisor de presión (A/D - PROCESO – D/A) [16].	13
Figura 3.7. Gráfico del porcentaje de la producción [14].	15
Figura 3.8. Gráfico presión de entrada [14].	16
Figura 3.9. Transmisor de presión totalmente analógico [14].	17
Figura 3.10. Transmisor de presión inteligente [14].	18
Figura 3.11. Transmisor de presión error (ADC) [14].	19
Figura 3.12. Transmisor de presión error de salida (DAC) [14].	20
Figura 3.13. El método de señalización HART incluye digital y analógico [19].	21
Figura 3.14. Señal de control 4-20 mA [22].	22
Figura 3.15. Comunicador de campo 475 [23].	23
Figura 3.16. Diagrama de cableado para la calibración del transmisor.	24
Figura 4.1. Plano del sistema Hidráulico.	28
Figura 4.2. Diagrama eléctrico de lazo de 4-20 mA.	29
Figura 4.3 Diagrama del flujo del Comunicador de campo HART 475.	31
Figura 4.4. Diagrama del flujo del procedimiento.	32
Figura 4.5 Diagrama de flujo experimental.	33
Figura 4.6. Fuente de alimentación de 24 VDC al transmisor.	34
Figura 4.7. Comunicador de campo HART 475.	34
Figura 4.8. Medición de corriente 4-20 mA. Con multímetro digital UNI-T modelo UT39C.	35
Figura 4.9. Montaje completo para calibración del transmisor de presión.	36
Figura 5.1. Sistema completo de calibración implementado.	41
Figura 5.2. Bomba conectada al Transmisor.	42
Figura 5.3. Medición del Multímetro digital UNI-T modelo UT39C.	42
Figura 5.4. Comunicador mostrando la variable PV.	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1]	1
Tabla 2.1. Sistema de tareas.....	6
Tabla 4.1. Secuencia ordenada de actividades.....	26
Tabla 4.2. Especificaciones del transmisor.....	29
Tabla 4.3. Especificaciones del Multímetro	29
Tabla 4.4. Especificaciones de la fuente.....	30
Tabla 5.1. Datos antes del ajuste HART	44
Tabla 5.2. Tabla de error antes del ajuste.....	46
Tabla 5.3. Datos después del ajuste HART	48
Tabla 5.4. Error porcentual después del ajuste	50
Tabla 5.5. Comparación global.....	51
Tabla 5.6 Comparación de rangos	52

1. INFORMACIÓN GENERAL

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

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Electromecánica

Trabajo de titulación vinculado al proyecto: No aplica

Equipo de Trabajo: Pullozasig Lema Luis Miguel, Toaquiza Chimba Jhonatan Saul

Tutor: Ing. M.Sc. Freire Martínez Luigi Orlando

Área de Conocimiento:

En 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

Línea de investigación: Procesos Industriales.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos

2. INTRODUCCIÓN

En la industria moderna, la medición de variables de proceso constituye un elemento básico para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad de las instalaciones y la calidad de los productos [2]. Entre estas variables, la presión destaca por su presencia constante en procesos hidráulicos, neumáticos y de control térmico, siendo medible mediante sensores y transmisores especializados que convierten una magnitud física en una señal utilizable por sistemas de supervisión y control [3].

El estándar analógico de la señal de corriente de 4-20 mA ha sido durante décadas la forma más común de transmitir información de sensores hacia los sistemas de control, debido a su simplicidad, robustez frente al ruido y compatibilidad con los equipos existentes [4]. Sin embargo, esta señal solo transmite una variable de procesos, sin permitir acceder a datos internos del instrumento, como diagnóstico, estado de sensor o parámetros de configuración [5]. Esta limitación complica tareas de calibración, configuración y mantenimiento. ya que no ofrece formas de verificar si un error de medición proviene de una falla interna del transmisor o de condiciones externas.

Para superar estas restricciones, se utiliza el protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer), un estándar de comunicación híbrido que superpone datos digitales sobre las señales analógicas de 4-20 mA sin interferir en su función principal [5]. HART permite transmitir y recibir datos adicionales, como identificadores de dispositivos, diagnósticos, valores de proceso digitalizado y parámetros de configuración, lo que facilita procedimientos de calibración y monitoreo avanzado directamente desde un comunicador o un sistema maestro [6].

La comunicación de la señal analógica 4-20 mA con la comunicación digital HART ofrece ventajas importantes para instrumentación industrial, ya que permite la lectura remota de múltiples variables, la configuración de parámetros y la ejecución de diagnóstico sin interrumpir el lazo de corriente [3]. Esto resulta especial especialmente útil en transmisores de presión inteligentes. donde la precisión de la medición y la trazabilidad de los ajustes son requisitos críticos para el control de procesos y el cumplimiento de normativas técnicas [7].

Este trabajo tiene como propósito aplicar el protocolo HART para desarrollar un procedimiento de calibración de transmisores de presión, integrando los tres procesos claves de señal: conversión analógico-digital (A/D), procesamiento interno (PROCESO) y conversión digital-analógica (D/A). Se utilizará un generador de presión para aplicar valores conocidos junto con

un comunicador HART 475 para acceder a parámetros internos y ajustar los valores de calibración. El objetivo es evaluar si el uso de HART mejora la precisión de medición, reduce el error de calidad calibración y optimiza los tiempos de intervención, en comparación con métodos tradicionales que solo utilizan la señal de 4-20 mA [8].

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En los entornos industriales, la medición de variables físicas como la presión es fundamental para garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia de los sistemas de control. Los transmisores de presión son instrumentos ampliamente utilizados para transformar la presión del proceso en una señal eléctrica proporcional que pueda ser interpretada por sistemas de monitoreo y control. Sin embargo, con el tiempo estos instrumentos pueden presentar desviaciones en su funcionamiento debido a factores como el desgaste mecánico del sensor, variaciones térmicas, cambios en las condiciones de operación o el envejecimiento de los componentes electrónicos.

Estas condiciones pueden provocar errores en la medición de la presión, afectando la confiabilidad de los datos utilizados en los procesos industriales. En muchos casos, la calibración de los transmisores se realiza únicamente mediante la verificación de la señal analógica de salida de 4–20 mA, con un margen de error del $\pm 1\%$ lo que limita la posibilidad de analizar el comportamiento interno del instrumento y detectar posibles desviaciones en las etapas de conversión y procesamiento de la señal.

Ante esta situación, surge la necesidad de implementar procedimientos de calibración que permitan evaluar con mayor precisión el funcionamiento de los transmisores de presión. En este contexto, el protocolo HART permite acceder a la información interna del instrumento y realizar ajustes de calibración que contribuyan a reducir el error de medición y mejorar la exactitud del sistema de medición.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Cómo la aplicación de un procedimiento de calibración mediante el protocolo HART permite reducir el error de medición en transmisores de presión en función de la presión aplicada.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

El proceso de calibración de transmisores de presión industriales mediante el uso de protocolo de comunicación HART.

2.3.2. Campo de acción: 3310 Tecnología Industrial

Como campo de acción se obtiene la tecnología industrial ya esta se obtiene mediante la implantación de los diferentes controles y su aplicación en la industria, donde su principal área de desarrollo es la automatización e ingeniería de control de procesos [1].

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directo

Estudiantes de la facultad de CIYA de la universidad Técnica de Cotopaxi, especialmente aquellos que cursan asignaturas relacionadas con instrumentos y automatización industrial.

2.4.2. Indirecto

De manera indirecta este proyecto beneficiará a la institución educativa, al contribuir al fortalecimiento de sus prácticas de laboratorio y la actualización de sus metodologías de enseñanza conforme a tecnologías industriales actuales. También se beneficiará futuras generaciones de estudiantes, quienes podrán utilizar el procedimiento desarrollado como referencia para trabajos académicos y prácticos experimentales.

Finalmente, el sector industrial se verá beneficiado de forma indirecta ya que los estudiantes formados con conocimientos prácticos en calibración y comunicación HART estarán mejor preparados para enfrentar la exigencia técnica del entorno laboral.

2.5. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en los procesos industriales modernos, la medición de variables físicas constituye un elemento fundamental para garantizar la estabilidad, seguridad y eficiencia de los sistemas de control. Entre estas variables, la presión ocupa un papel relevante en múltiples aplicaciones industriales, ya que su medición permite supervisar el funcionamiento de equipos, tuberías y sistemas de producción. Por esta razón, los transmisores de presión se utilizan ampliamente para convertir la presión del proceso en una señal eléctrica que pueda ser interpretada por sistemas de control y monitoreo.

Sin embargo, con el paso del tiempo los instrumentos de medición pueden presentar desviaciones en su funcionamiento debido a diversos factores como el desgaste mecánico del sensor, cambios en las condiciones ambientales, variaciones térmicas o el envejecimiento de los componentes electrónicos. Estas condiciones pueden generar errores en la medición de la presión, afectando la confiabilidad de los datos obtenidos y, en consecuencia, la toma de decisiones dentro del proceso industrial.

Ante esta situación, los procedimientos de calibración se convierten en una herramienta fundamental para verificar y ajustar el comportamiento de los instrumentos de medición. Tradicionalmente, la calibración de transmisores de presión se ha realizado mediante la verificación de la señal analógica de salida en el rango de 4–20 mA. No obstante, este método presenta limitaciones, ya que no permite acceder directamente a los parámetros internos del transmisor ni evaluar con precisión el comportamiento de las etapas internas de procesamiento de la señal.

En este contexto, el protocolo de comunicación HART (Highway Addressable Remote Transducer) representa una alternativa tecnológica que permite mejorar los procesos de calibración y diagnóstico de los instrumentos de campo. Este protocolo combina la señal analógica de 4–20 mA con una comunicación digital que posibilita el acceso a información interna del transmisor, facilitando la configuración de parámetros como el ajuste de cero y el ajuste de rango.

Por lo tanto, la presente investigación se justifica en la necesidad de desarrollar un procedimiento de calibración que permita aprovechar las ventajas del protocolo HART para mejorar la exactitud de los transmisores de presión. Mediante la aplicación de este procedimiento es posible evaluar el comportamiento del instrumento en diferentes puntos del rango de medición y determinar la reducción del error asociado al proceso de medición.

De esta manera, el desarrollo de un procedimiento de calibración basado en el protocolo HART contribuye a mejorar la confiabilidad de los sistemas de medición en entornos industriales, permitiendo obtener datos más precisos y favoreciendo una adecuada toma de decisiones en los procesos de control y monitoreo.

Desde el ámbito académico este trabajo aporta una guía práctica que puede ser utilizada en laboratorios de automatización facilitando la formación de estudiantes con competencias acordes a la exigencia del entorno laboral además el proyecto promueve el uso eficiente de la instrumentación disponible integrando teoría y práctica de manera aplicada En este sentido la

investigación no solo tiene relevancia técnica sino también formativa al preparar profesionales con una visión más cercana a la realidad industrial.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Aplicar un procedimiento técnico de calibración de transmisores de presión mediante el protocolo de comunicación HART para evaluar la reducción del error de medición en función de la presión aplicada.

2.6.2. Específicos

- Investigar el funcionamiento del protocolo HART en transmisores de presión mediante la revisión de información técnica y bibliográfica, para comprender su aplicación en procesos de calibración de instrumentación industrial.
- Seleccionar los equipos y herramientas necesarios para la calibración del transmisor de presión mediante el análisis de las características técnicas de los instrumentos disponibles, para garantizar condiciones adecuadas durante el proceso experimental.
- Aplicar el procedimiento de calibración del transmisor de presión mediante el uso del comunicador de campo HART y la aplicación de presión controlada, para realizar ajustes en los parámetros del instrumento.
- Validar el procedimiento de calibración mediante la comparación de los valores de presión aplicados y la señal de salida del transmisor, para evaluar la reducción del error de medición del instrumento.

2.6.3. Sistema de tareas

En la tabla 2.1 Sistema de tareas, se visualiza todas las actividades de la presente propuesta tecnológica.

Tabla 2.1. Sistema de tareas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS	MEDIO DE VERIFICACIÓN
Investigar el funcionamiento del Protocolo HART en transmisores de presión utilizados en procesos industriales.	Recopilación de información bibliográfica sobre el protocolo HART, comunicación digital y calibración de transmisores de presión.	Comprensión teórica del funcionamiento del protocolo HART y su aplicación en la calibración de sensores de presión.	Artículos científicos, libros técnicos, normas y manuales especializados.
	Revisión documental de estudios y aplicaciones	Identificación de criterios técnicos y parámetros	Artículos científicos, tesis, documentación

	industriales relacionadas con la validación de datos y comunicación HART.	relevantes para la calibración mediante HART.	técnica.
Seleccionar los equipos y herramientas utilizadas en el proceso de calibración del transmisor de presión.	Análisis de los diferentes tipos de comunicación HART disponibles en instrumentación industrial.	Selección del método de comunicación HART más adecuado para el proceso de calibración.	Manuales técnicos, hojas de datos, normas industriales.
	Selección y configuración del comunicador HART 475 para el uso en el proceso de calibración.	Definición del equipo y parámetros necesarios para la comunicación efectiva con el transmisor de presión.	Manual del comunicador HART 475, guías del fabricante.
Desarrollar el procedimiento de la calibración del transmisor de presión mediante comunicador HART.	Elaboración del procedimiento de calibración para la etapa PROCESO utilizando el generador de presión.	Procedimiento documentado para la aplicación y verificación de presión en el transmisor.	Procedimiento técnico elaborado, Registro experimentales.
	Desarrollo del procedimiento de calibración en la etapa Digital mediante comunicación digital HART.	Ajuste y validación de parámetros internos de transmisor mediante comunicación digital.	Registro de comunicación HART, configuraciones del transmisor.
	Elaboración del procedimiento de calibración en etapa Análoga mediante verificación de la señal 4-20 mA.	Verificación de la correspondencia entre la señal analógica de salida y el valor de presión aplicado.	Mediciones de corriente, hojas de registro.
Validar el procedimiento de calibración mediante la evaluación del error de medición del transmisor.	Ejecución del procedimiento de calibración completo en los tres procesos definidos.	Obtención de datos experimentales antes y después de la calibración.	Registro de calibración, tablas de datos.
	Análisis comparativo del error de medición antes y después de aplicar el procedimiento HART.	Validación de la reducción del error de medición y mejora en la presión del transmisor.	Gráficos, cálculos de error, análisis de resultados.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

En la industria actual, la confiabilidad de los sistemas de medición constituye un factor determinante para garantizar la seguridad, eficiencia y calidad de los procesos productivos. Dentro de las variables industriales más relevantes se encuentra la presión, debido a que una medición incorrecta puede generar fallas operativas pérdidas económicas e incluso riesgos para el personal. Por esta razón, los transmisores de presión han evolucionado progresivamente desde dispositivos analógicos básicos hasta instrumentos inteligente con capacidad de comunicación digital y diagnóstico avanzado [9].

Es significativo resaltar los aportes realizados por Andrés Otero y Walter de Jesús Canova García, quién es en el año 2021 desarrollaron la tesis titulada “Diseño e implementación de un programador de transmisores de presión Honeywell basados en el Protocolo HART”. En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo capaz de comunicarse con transmisores de presión mediante protocolo permitiendo la configuración diagnóstico y verificación de parámetros operativos del instrumento. Los autores demuestran que el uso de HART facilita la interacción directa con el transmisor mejorando los procesos de calibración y manteniendo en entornos industriales [10].

Por otro lado, Deivid Efraín Téllez, Asfur Barandica López, E. Rodríguez y Jorge Ramires en el año 2020 desarrollaron el estudio Arquitectura para transmisores HART de alta exactitud”, en el cual propone una arquitectura orientada a mejorar la precisión de los transmisores de presión mediante el uso combinado de señales analógicas y comunicación digital HART. El trabajo evidencia que la integración de HART permite acceder a variables internas al transmisor, optimizando el desempeño metroológico y garantizando mayor confiabilidad en la medición de variables de proceso [11].

De manera complementaria Rafii Trimetta Wintio, Brainvendra Widi Dionova y ahmad Yusuf publicaron en el 2024 El artículo “Validation o Pressure Transmitir input output look testing bas Con hybrid Analogic and Digital HART Communication”. En este trabajo se valida la eficiencia de las pruebas de rasgo que convida la señal analógica 4-20 mA con la comunicación digital HART Comiendo que en este enfoque permite una detección más precisa de fallas Mejora la confiabilidad del sistema de medición y optimiza los procesos de mantenimiento y validación industrial [12].

Estos trabajos de evidencian que, si bien existen investigaciones relacionadas con transmisores de presión y el protocolo HART, aún se identifica en la necesidad de desarrollar procedimientos específicos de calibración que integren de manera sistemática la comunicación como herramientas principales para mejorar la precisión de la medición, lo cual justifica la presente investigación.

3.2. PROCESO INDUSTRIAL

Un proceso industrial puede definirse como un conjunto organizado de operaciones mediante las cuales se transforman materias primas en productos finales, utilizando equipos e instrumentos de medición y control la correcta medición de las variables del proceso constituye la base para garantizar condiciones de operaciones seguras y eficientes [8].

3.2.1. Proceso continuo

Los procesos continuos se caracterizan por operar de forma ininterrumpida durante largos períodos de tiempo, lo que exige sistemas de medición confiables y estables. En este tipo de procesos, la presión desempeña un papel fundamental ya que influye directamente en el comportamiento de fluidos, reacciones químicas y sistemas de transporte [13].

Debido a estas exigencias, los transmisores de presión deben mantener su exactitud a lo largo de tiempo, siendo indispensables la realización de calibraciones periódicas que permitan detectar y corregir desviaciones antes de que afecten la operación del sistema.

3.3. SISTEMA DE REGULACION O CONTROL

Un sistema de regulación o control está conformado por un conjunto de elementos que interactúan entre sí para mantener una variable de proceso dentro de valores previamente establecidos. Estos sistemas reciben señales de entrada, procesan la información y generan señales de salida que influyen directamente sobre el comportamiento del proceso [14].

De manera conceptual se ilustra la presentación de operatividad de un sistema en las figuras 3.1. Esquema de funcionamiento del sistema.

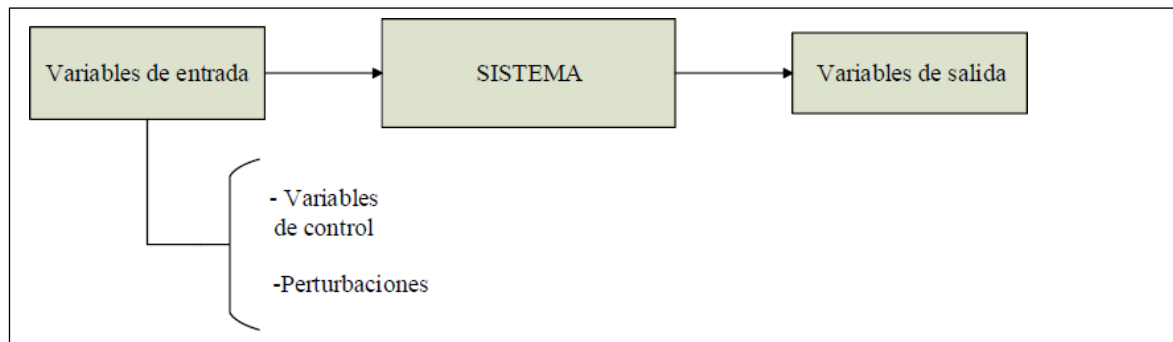


Figura 3.1. Esquema del funcionamiento de un sistema [11].

3.3.1. Control automático

El control automático permite regular procesos industriales sin la intervención constante del operador humano. Incrementa la productividad y reduce errores operativos. La confiabilidad del control automático depende en gran medida de la precisión de los sensores y transmisores encargados de medir las variables del proceso [14].

3.3.2. Sistema de control en lazo abierto

Dentro de la ingeniería de control un sistema de las abierto se distingue por un monitoreo el resultado de salida ni utilizarlo como señal de ajuste para la entrada. De acuerdo con el esquema de la figura 3.2, esta estructura implica que la señal de mando es independiente de la respuesta obtenida.

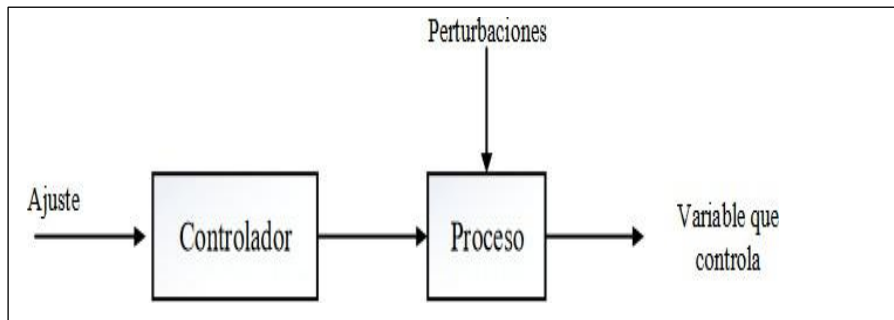


Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto [11].

En términos prácticos este modelo se implementa exclusivamente cuando la interacción entre en la entrada y la salida es predecible y se asume un entorno libre de alteraciones o ruidos tanto internos como ajenos al proceso. Pero consiguiente dado que el sistema no realiza un comportamiento entre la referencia y la salida real su exactitud operativa depende totalmente de una calibración inicial exacta.

3.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado

Por el contrario, un sistema de control en lazos cerrado se caracteriza por un funcionamiento donde la acción correctiva está básicamente ligada al comportamiento de la salida. Este mecanismo opera mediante la realimentación de la señal controlada la cual contrasta de forma permanente con el valor de consigna o set point. Como resultado de esta comparación se generó una señal de error que permite el sistema enviar una respuesta actuante proporcional a la desviación detectada logrando hacia autorregulación precisa [14].

La arquitectura de este proceso se detalla en la figura 3.3, donde se ilustra gráficamente el flujo de la señal de control de la su cerrada es fundamental destacar que este esquema constituye el Pilar central del presente estudio ya que las metodologías de control que se evaluarán a lo largo de esta investigación han sido desarrolladas específicamente para operar bajo este principio de retroalimentación[14].

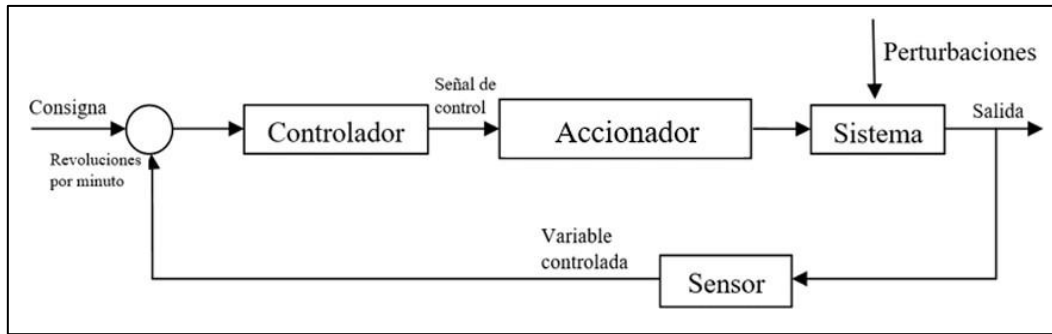


Figura 3.3. Sistema de control lazo cerrado [11].

Variable controlada: Es el resultado del sistema, en otras palabras, la proporción que se controla y mide. La velocidad de giro del motor en el la investigación se retroalimenta al sistema a través del sensor y ayuda al controlador a tomar decisiones al ejecutar el sistema.

Sensor: Se trata de un dispositivo que capta una magnitud física del entorno y la convierte en una señal, generalmente eléctrica, que puede ser medida y controlada.

Señal de control: Conocida también como una variable manipulada, es la condición que el controlador ajusta para influir en el valor de la variable controlada.

Accionador: Hace referencia a la parte del sistema responsable de amplificar la señal de control, ya que el controlador la genera con una potencia demasiado baja para manejar directamente equipos eléctricos, como un motor.

Consigna: Es el valor deseado para la variable controlada, es decir, el valor predefinido al que se espera que se establezca la respuesta del sistema.

Perturbaciones: Es la señal interna o externa (entrada) que influye de manera negativa en el valor de la variable controlada de algún sistema [13].

3.4. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

La instrumentación industrial comprende el conjunto de dispositivos destinados a medir transmitir y procesar variables físicas dentro de un proceso productivo. Estos dispositivos permiten supervisar el estado del sistema y constituyen la base para la toma de decisiones operativas de mantenimiento en entornos industriales [7].

3.4.1. Transmisores de presión

Un transmisor de presión es un instrumento que convierte la presión aplicada sobre un sensor en una señal eléctrica proporcional generalmente estandarizada en el rango de 4-20 mA [15].

En la Figura 3.4 Podemos observar los 3 procesos internos del transmisor de presión inteligentes (sensor - ADC – microprocesador – DAC – 4-20 mA).

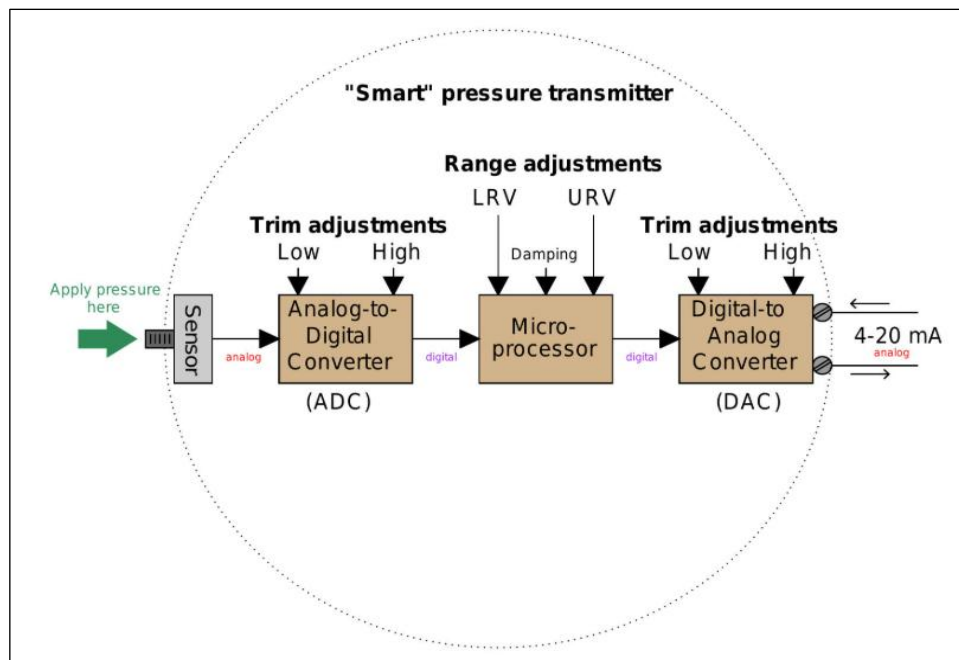


Figura 3.4. Procesos internos del transmisor de presión [14].

Los transmisores modernos incorporan sensores de alta precisión convertidores analógicos-digitales microprocesadores y convertidores digital-analógicos. En la Figura 3.5 podemos observar el funcionamiento y la parte interna del transmisor de presión [15]

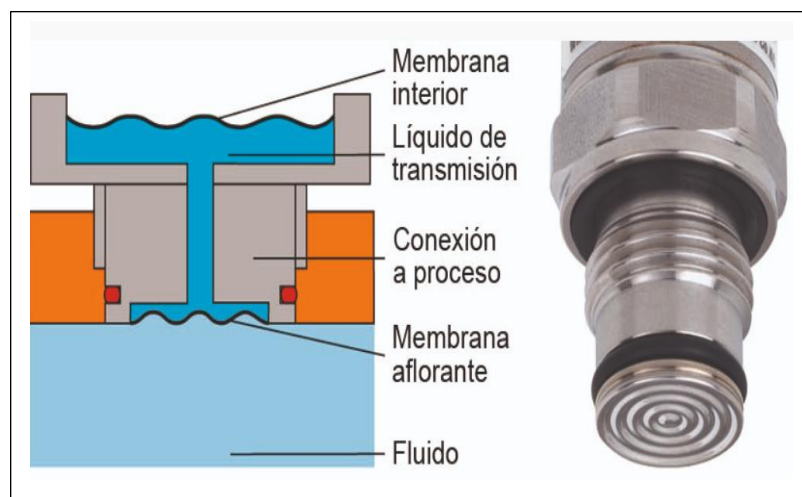


Figura 3.5. Funcionamiento parte interna del Transmisor [13]

Los transmisores de presión modernos utilizan sensores de tecnología capacitiva los cuales presenta una alta sensibilidad y buena estabilidad a largo plazo. Estos sensores convierten la presión aplicada en una señal eléctrica que posteriormente es accionada y procesada

internamente. Además de la señal analógica estándar de 4-20 mA, los transmisores inteligentes incorporan capacidades de comunicación digital que permiten acceder a información adicional, como valores de diagnóstico, estado del sensor y parámetros de configuración, mejorando la gestión de mantenimiento industrial [16]

3.5. PROCESOS INTERNOS DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN

El funcionamiento interno de un transmisor de presión inteligente se basa en una arquitectura compuesta por un sensor de presión con un conversor analógico-digital o un microprocesador y un conversor digital-analógico, cada una de estas etapas influye directamente en la exactitud final de la medición [17]. En la Figura 3.6 observamos el diagrama de funcionamiento interno de un transmisor de presión inteligente

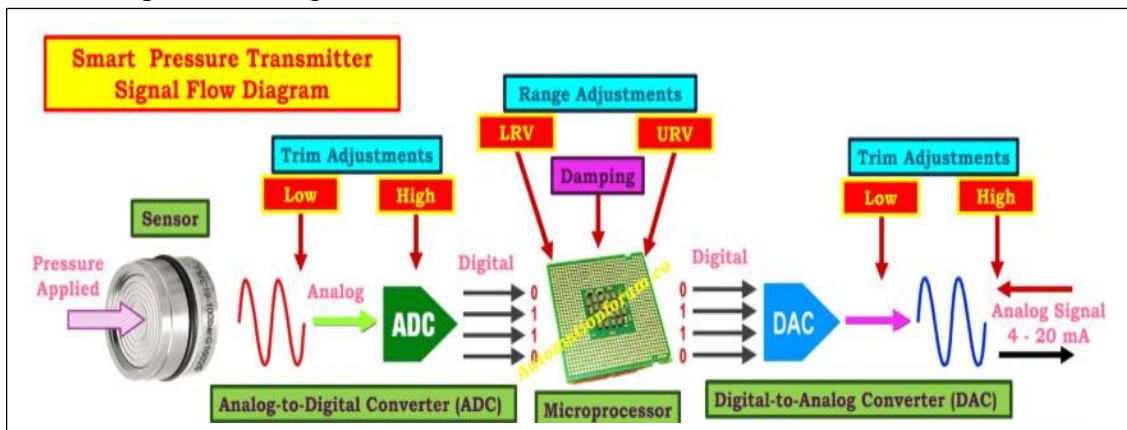


Figura 3.6. Diagrama de funcionamiento interno de un transmisor de presión (A/D - PROCESO - D/A) [16].

3.5.1. Conversión Analógico-Digital (A/D)

La señal analógica proviene del sensor es convertida en información digital mediante un conversor analógico-digital (ADC). Esta etapa permite que la señal sea procesada internamente por el microprocesador del transmisor, influyendo directamente en la resolución y precisión del sistema de medición [10].

3.5.2. Procesamiento digital de la señal

En el microprocesador se realizan compensaciones, escalamiento y filtrado de la señal digital además en esta etapa se configura parámetros como LRV y URV, los cuales definen el rango operativo de transmisor [10].

3.5.3. Conversión Digital-Analógica (D/A)

En Información procesada es convertida nuevamente en la señal analógica de 4-20 mA mediante un conversor digital analógica La correcta calibración de esta etapa garantiza que la señal de salida represente fielmente la precisión medida [10].

3.6. CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS

La calibración de instrumentos es el proceso mediante el cual se compara la indicación de un instrumento de medición en un valor de referencia conocido y trazable, con el fin de determinar y corregir posibles errores. Este procedimiento es fundamental para garantizar la confiabilidad y la exactitud de las mediciones industriales [14].

3.6.1. Calibración y ajuste de rango

Es importante diferenciar el proceso de calibración del ajuste de rango o ranging. Mientras que la calibración busca asegurar la correspondencia entre la entrada física y la salida del instrumento el ajuste consiste únicamente en modificar los valores de LRV y URV, sin verificar la exactitud real del sensor lo que puede conducir a errores de medición no detectados[4].

Ajustar el rango de un instrumento significa ajustar los valores inferior y superior del rango para que responda con sensibilidad deseada a los cambios de la entrada. Por ejemplo, un transmisor de presión ajustada en un rango de 0 a 150 PSI (0PSI = Salida de 4 mA; 150 PSI = salida de 20 mA), podría reajustarse para responder a una escala de 0 a 50 PSI (0 PSI = 4 mA; 50 PSI = 20 mA).

3.6.2. Ajuste de Zero y de Span (Instrumentos analógicos)

Los ajustes de Zero y Span permiten corregir el deslizamiento de la señal y la pendiente de la respuesta al transmisor. Un ajuste incorrecto de estos parámetros puede generar errores sistemáticos en toda la escala de medición, afectando directamente la señal de salida del transmisor [18].

En el siguiente gráfico 3.7 se muestra cómo cualquier porcentaje dado de entrada debe corresponder al mismo porcentaje de la producción, desde el 0% hasta el 100%

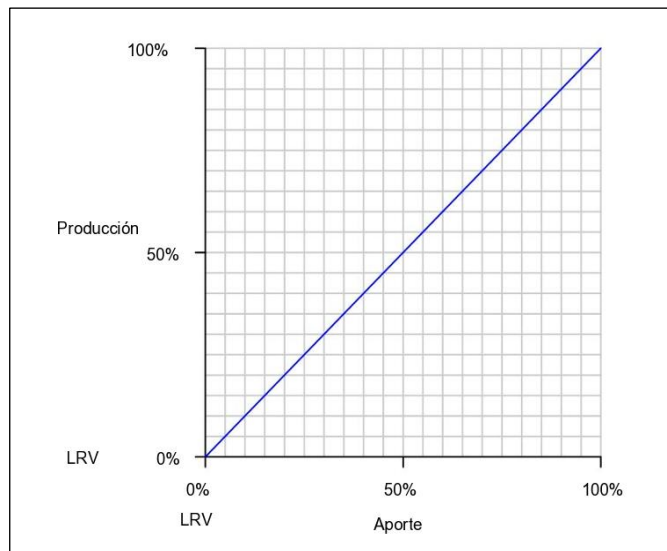


Figura 3.7. Gráfico del porcentaje de la producción [14].

3.6.3. Ajuste de Zero y Span instrumentos analógicos

El proceso de calibración de instrumentos analógicos puede presentar cierta complejidad cuando las variables de entrada y salida se expresan en unidades distintas al porcentaje [18]. Un caso representativo es el transmisor de presión, dispositivos diseñados para medir la presión de un fluido y convertir dicha magnitud en una señal eléctrica proporcional [19].

Habitualmente, estos transmisores presentan un rango de entrada de presión, por ejemplo, de 0 a 150 libras por pulgada cuadrada (PSI), y un rango de salida eléctrica estandarizado de 4 a 20 miliamperios (mA) [19].

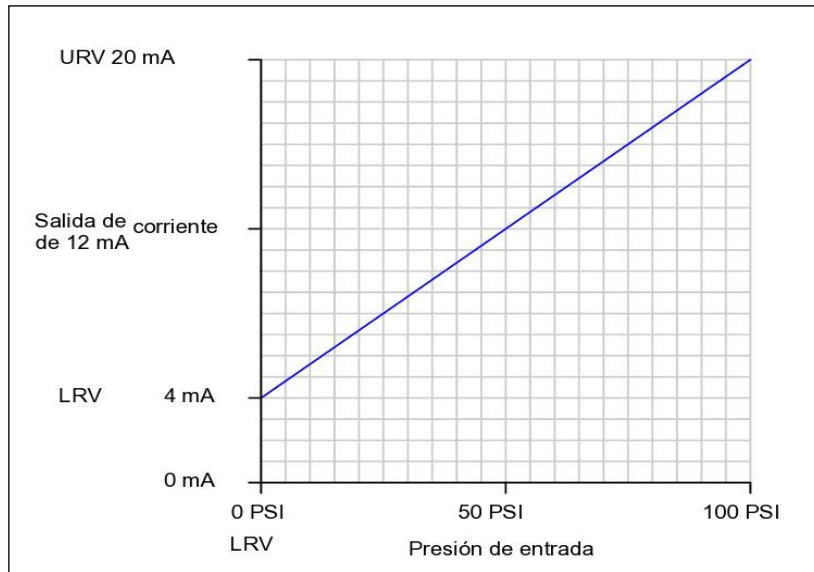


Figura 3.8. Gráfico presión de entrada [14]

Aunque la relación entre la presión aplicada y la señal de salida es lineal, el valor de presión Zero no corresponde a una corriente de salida nula. Este comportamiento se conoce como Zero activo ya que el punto correspondiente al 0% del rango de medición (0 PSI) se asocia a una señal eléctrica distinta de Zero, especialmente 4 mA. En este contexto el valor inferior del rango de entrada del transmisor LRV puede ser 0 PSI, como se observa en la figura 3.8 mientras que el valor inferior del rango de salida es de 4 mA y no 0 mA [19].

Desde el punto de vista matemático el comportamiento de un transmisor lineal puede describirse en la fórmula 3.1 mediante la ecuación de la recta en su forma pendiente intersección expresada como[19]:

$$y = mx + b \quad (3.1)$$

Donde:

y = representan la variable de salida

x = la variable de entrada

m = la pendiente de la recta

b = el punto de intersección con el eje vertical aplicando este modelo a un transmisor de presión donde x corresponde a la presión en PSI e Y a la corriente de salida en mA, se obtiene una relación lineal que define el comportamiento del instrumento[19]:

$$y = 0.16x + 4 \quad (3.2)$$

Cálculo de Corriente Teórica

$$I = 4 + 16 \left(\frac{P - LRV}{URV - LRV} \right) \quad (3.3)$$

Error porcentual

$$Error (\%) = \frac{I_{medido} - I_{teorico}}{16} * 100 \quad (3.4)$$

3.6.4. Ajustes de LRV y URV, Ajuste digital (Transmisores digitales)

La integración de microprocesadores en los instrumentos de campo, conocidos hoy como dispositivos “inteligentes” ha marcado un antes y después en la instrumentación industrial. Estos equipos no solo captan variables, sino que ofrecen diagnósticos avanzada y una precisión superior al compensar digitalmente cualquier error de alineación del sensor. Además, su capacidad para establecer comunicación digital con sistemas host permite una gestión de datos mucho más robustos y la generación de reportes detallados sobre múltiples parámetros operativos [19].

La siguiente Figura 3.9. cuenta con todos los ajustes dentro del dispositivo y cómo se compara con la relatividad simplicidad de un transmisor de presión totalmente analógica.

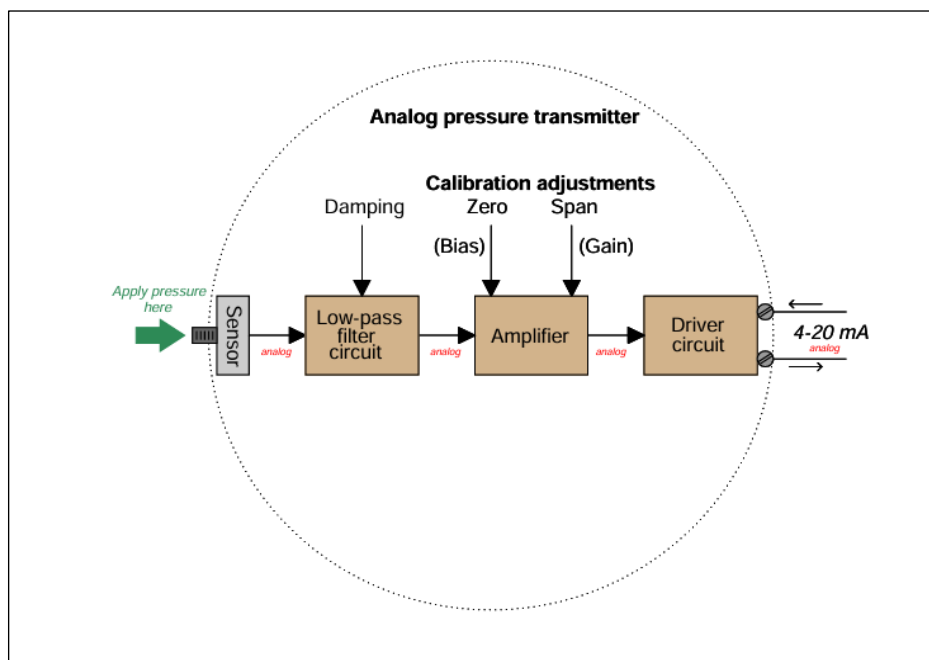


Figura 3.9. Transmisor de presión totalmente analógico [14].

3.6.5. Ajustes de LRV y URV, Trim Digital (Transmisores digitales)

Cuando se aplica una presión real de 100 PSI al transmisor puede ocurrir que el convertidor analógico digital interprete derecho valor como si fuera únicamente 96 PSI aun cuando el resto de los componentes de transmisor funcionan correctamente y el equipo haya sido sometido a un proceso de calibración al cuadro. Esta desviación en la interpretación de la señal provoca que la salida del instrumento continúe haciendo inexacta [19].

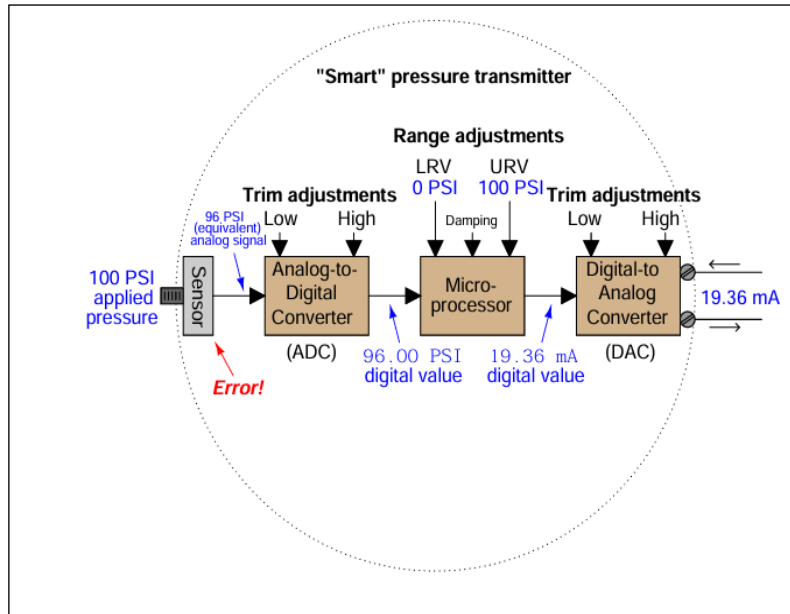


Figura 3.10. Transmisor de presión inteligente [14].

Esta situación evidencia que los errores originados en las etapas internas de conversión y procesamiento de la señal no siempre puede corregirse mediante ajustes convencionales en la salida por ello resulta indispensable identificar y corregir las desviaciones en cada una de las etapas del transmisor especialmente en aquellas asociaciones del sensor y el proceso de conversión analógico digital para garantizar una medición confiable [14].

3.7. VERIFICACIÓN DEL CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL (A/D) MEDIANTE COMUNICACIÓN HART

Una forma práctica de evaluar el funcionamiento del convertidor analógico digital de un transmisor consiste en supervisar los registros internos de las variables del proceso (PV) y de la salida analógica (AO) del microprocesador. Para ello, se comparan los valores de entrada reales con los valores internos del transmisor utilizando patrones de calibración confiables el uso de un comunicador permite acceder a esta información interna y observar cómo el

microprocesador interpreta la señal facilitando la detección de errores en la calibración del sensor [19].

En el siguiente ejemplo se muestra la figura 3.11 un transmisor de presión diferencial con un error de calibración del sensor analógico digital.

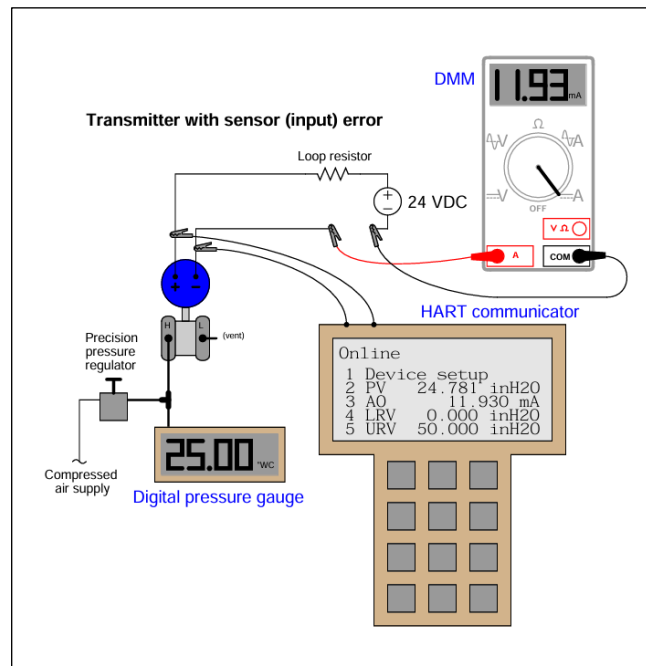


Figura 3.11. Transmisor de presión error (ADC) [14].

Este sistema combina la medición de presión con una comunicación digital avanzada (HART), permitiendo no solo obtener datos precisos en tiempo real, sino también realizar configuraciones y diagnósticos sin necesidad de desconectar o alterar físicamente los instrumentos. La integración de un transmisor con sensor, un medidor digital y un sistema de comunicación digital refleja una arquitectura moderna de instrumentación, que busca mejorar la eficiencia, precisión y facilidad de mantenimiento en procesos industriales. [12].

El uso de corriente de 4-20 mA como señal estándar facilita la transmisión de datos en entornos industriales, siendo resistente a interferencias y permitiendo largas distancias de transmisión. La interfaz HART amplía esta funcionalidad al permitir la comunicación digital, que puede incluir parámetros adicionales, diagnósticos y configuraciones remotas, incrementando la confiabilidad y la facilidad de gestión del sistema. [14].

3.8. VERIFICACIÓN DEL CONVERTIDOR DIGITAL-ANALÓGICO (D/A) MEDIANTE COMUNICACIÓN HART

Una manera efectiva de comprobar el correcto funcionamiento del convertidor digital-analógico consiste en analizar la relación entre el valor digital procesado internamente por el transmisor y la señal analógica de salida generada en el lazo de corriente de 4-20 mA. Mediante el uso del Protocolo HART, es posible acceder a los registros internos del microprocesador y comparar el valor digital calculado con la corriente de la de salida medida, utilizando equipos de referencia confiables. Este procedimiento permite identificar desviaciones en la etapa de D/A que no puede detectarse únicamente mediante la observación de la señal analógica externa [19].

En el siguiente ejemplo se muestra la figura 3.1 un transmisor de presión diferencial con un error de calibración del sensor

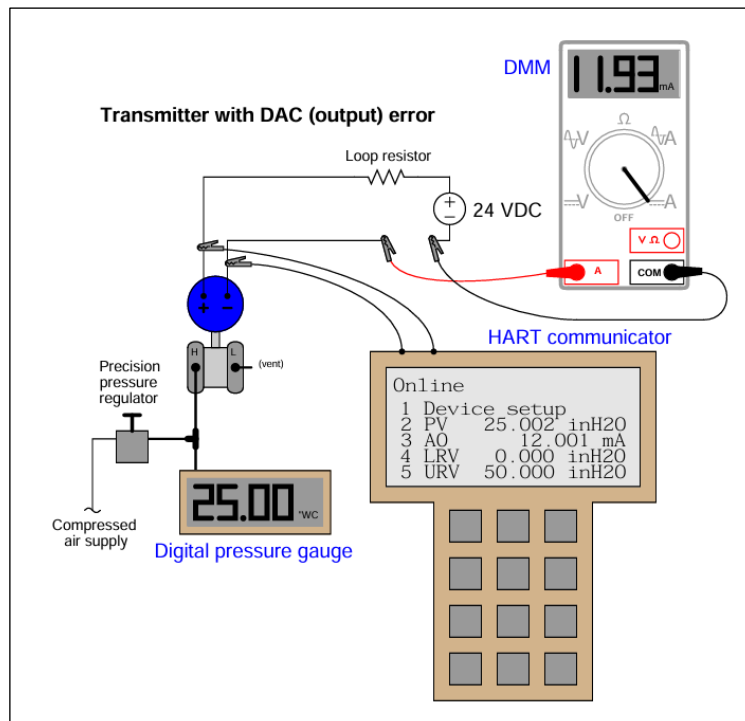


Figura 3.12. Transmisor de presión error de salida (DAC) [14].

3.9. COMUNICACIÓN HART

Los procesos industriales se requieren de una amplia variedad de instrumentos y dispositivos distribuidos en planta. Durante la operación es fundamental que el sistema de control central establezca un diálogo constante en estos equipos para llevar a cabo diversas tareas esenciales.

Estas tareas incluyen [21]:

Ajustar sus parámetros de funcionamiento, incluso durante la marcha.

Obtener datos sobre su rendimiento interno para prevenir fallas.

Identificar y resolver anomalías operativas.

Recolectar lecturas específicas más allá de las variables principales de control.

Evaluar de forma continua sus condición general y confiabilidad [21].

3.9.1. Principios de comunicación HART

El protocolo HART establece un diálogo entre 2 equipos que lo soportan típicamente entre un instrumento en campo y un sistema central de supervisión. Su ingenio reside en utilizar el mismo cableado tradicional de 4-20 mA para enviar, de forma superpuesta, información digital [20]. Para lograr esto, superpone una señal digital a la analógica mediante una técnica llamada modulación por cambios de frecuencia (FSK). Esta señal adicional emplea de tonos distintos: uno a 1200 Hz Para representar el bit 1 y otro a 2200 Hz para el bit 0. Esta modulación se realiza de manera que no interfiere en absoluto con la señal de corriente principal permitiendo así una comunicación bidireccional sin comprometer la medición primaria [21].

A continuación, podemos visualizar la siguiente Grafica 3.12. EL método de señalización HART incluye digital y analógico.

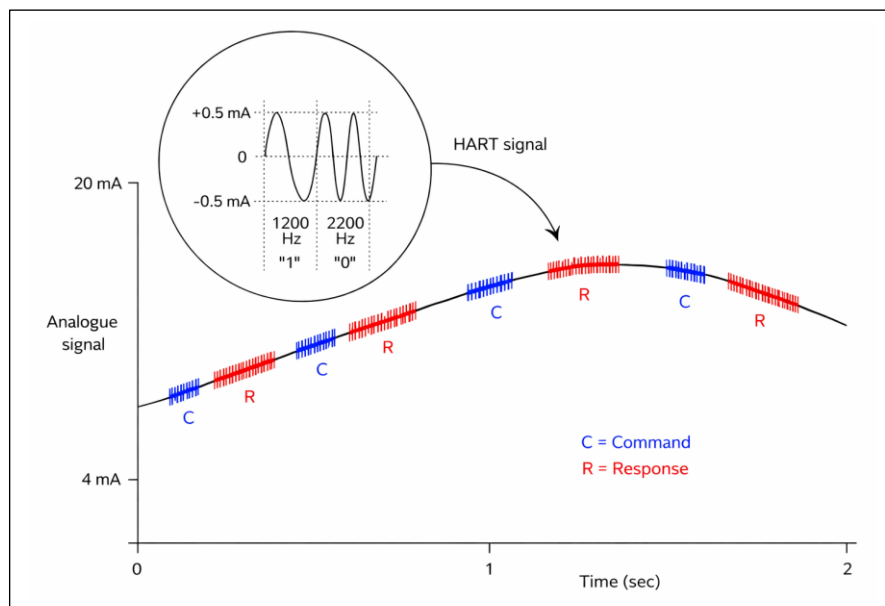


Figura 3.13. El método de señalización HART incluye digital y analógico [19].

3.9.2. Señal de control 4-20 mA y Protocolo HART

El protocolo HART puede entenderse como una señal adicional que se superpone al lazo de corriente estándar de 4-20 mA, permitiendo la transmisión de información digital entre el instrumento de campo y un dispositivo anfitrión [22]. De esta manera, un transmisor con tecnologías HART no sólo entrega la variable medida a través de la señal analógica, sino que

también es capaz de enviar datos digitales sin interferir con el funcionamiento normal del lazo de control. Este tipo de comunicación, el dispositivo anfitrión es el encargado de iniciar el intercambio de información y proporciona una interfaz que permite al usuario visualizar y

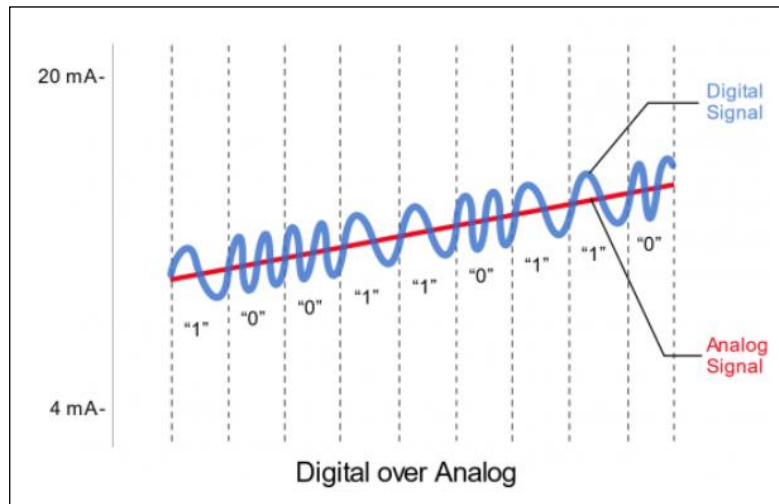


Figura 3.14. Señal de control 4-20 mA [22].

analizar los datos provenientes del instrumento, como valores de proceso, parámetros de configuración y diagnósticos. Esta característica facilita las tareas de supervisión, ajuste y mantenimiento de los transmisores en campo [23]. En el siguiente Figura 3.13. tenemos la señal de control de 4-20 mA.

Cabe destacar que el principio de funcionamiento del Protocolo HART es de exclusivo de la instrumentación industrial antes de la digitalización de los sistemas telefónicos una tecnología similar era utilizada en el servicio de identificación de llamadas. Esto donde se transmite información digital sobre una señal analógica, lo que demuestra es la eficiencia y confiabilidad de este método de comunicación.

3.10. COMUNICADOR HART 475

El comunicador HART 475 es un dispositivo portátil ampliamente utilizado en la industria para configurar calibrar y diagnosticar instrumentos compatibles en el protocolo HART. Su uso permite acceder a parámetros internos del transmisor tales como el valor inferior del rango LRV y el valor superior del rango URV, facilitando la ejecución de procedimientos de calibración más precisos y confiables [24].

En la figura 3.13. se puede visualizar el comunicador de campo HART 475.



Figura 3.15. Comunicador de campo 475 [23].

3.10.1. Calibración mediante protocolo HART

En un sistema de instrumentación que emplea el protocolo HART, la comunicación digital se realiza sobre el mismo lazo de corriente utilizado para la transmisión de la señal analógica de 4-20 mA. Este lazo está compuesto principalmente por una fuente de alimentación de corriente continua generalmente de 24 VDC, el transistor de presión, una resistencia de carga y dispositivo de comunicación o supervisión [25].

La resistencia de carga típicamente de 250 Ω (ohmios) cumple un papel fundamental ya que permite la superposición de la señal digital HART sobre la corriente analógica sin afectar la medición. La señal HART se transmite como una pequeña variación de corriente alterna que es interpretada por el comunicador o sistemas host. Durante las tareas de calificación y configuración, el comunicador HART se conecta en paralelo al lazo, permitiendo acceder a los parámetros internos de transmisor sin interrumpir el proceso de medición [26].

En la figura 3.14. se observa el diagrama de cableado para la calibración del transmisor de presión en un banco de trabajo mediante HART

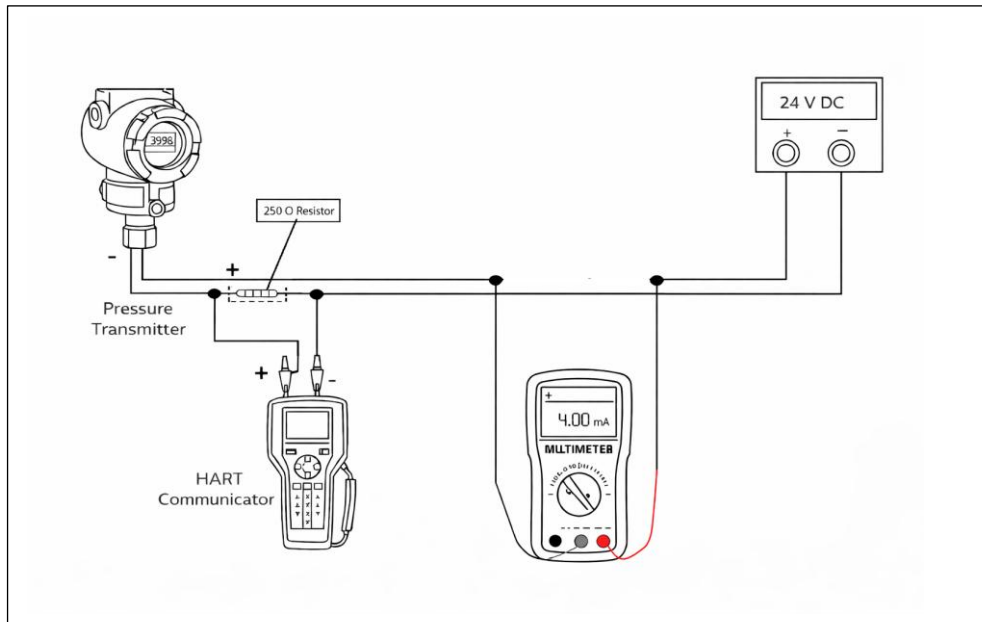


Figura 3.16. Diagrama de cableado para la calibración del transmisor.

3.11. EQUIPOS AUXILIARES PARA LA CALIBRACIÓN

3.11.1. Bomba generadora de presión

La bomba generadora de presión permite aplicar valores de presión conocidos y controlar al transmisor durante el proceso de calibración. Este equipo constituye el patrón de referencia para evaluar la respuesta al sensor y verificar la exactitud del instrumento [27].

3.11.2. Fuentes de alimentación de 24 VDC

Los transmisores de presión industriales requieren una fuente de alimentación externa comúnmente de 24 VDC para su correcto funcionamiento. Durante la calibración, una fuente estable garantiza la continuidad de lazo de corriente y evita errores en la señal de la salida [28].

3.12. RELACIÓN A LA FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA CON LA INVESTIGACIÓN

La fundamentación teórica desarrolla proporciona el sustento conceptual es necesario para la aplicación del protocolo HART en el proceso de calibración de transmisor de presión. Los conceptos abordados permiten analizar de forma integral los 3 procesos internos del transmisor y su influencia en la reducción del error de medición, alineándose directamente con los objetivos planeados en la investigación[28].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La metodología desarrollada en el presente estudio se describió de manera detallada de los métodos, técnicas, instrumentos y recursos utilizados para el desarrollo del procedimiento de calibración de un transmisor de presión mediante la aplicación del protocolo HART. Se expone el diseño del sistema experimental, el montaje mecánico e hidráulico de configuración, la configuración eléctrica el procedimiento de calibración y los métodos de cálculos empleados para evaluar la reducción del error de medición.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque experimental, ya que se basa en la aplicación controlada de presión sobre el transmisor y la observación directa del comportamiento de su señal internas y externas. De manera complementaria, se emplea un enfoque descriptivo, debido a que se analiza las características del proceso de calibración en cada una de sus etapas: proceso físico, conversión analógica-digital y conversión digital-analógica.

4.1. Declaración de variables

4.1.1. Variable independiente

Presión aplicada al transmisor de presión. Corresponde a los diferentes valores de presión generados durante el proceso de calibración para evaluar el comportamiento del instrumento.

4.1.2. Variable dependiente

Señal de salida del transmisor (corriente 4–20 mA). Es la respuesta del transmisor frente a la presión aplicada, utilizada para analizar la exactitud y el funcionamiento del equipo durante el estudio.

4.2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La metodología aplicada en este trabajo complementa una secuencia ordenada de actividades que permiten cumplir con los objetivos planteados. En la tabla 4.1 se resume en los procedimientos, métodos y equipos utilizados durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 4.1. Secuencia ordenada de actividades

Procedimiento	Método	Materiales - Instrumentos
Montaje del sistema de calibración	Experimental	Bomba manual de calibración para inyectores diésel. Transmisor de depresión HART. Mangueras depresión. Válvulas de paso. Acoples rápidos inoxidable. Conexión tipo T inoxidable. Niples acero inoxidable.
Configuración de lazo de corrientes	Experimental	Fuente 24 VDC. Resistencia de 250 ohmios. Multímetro digital.
Comunicación y parametrización HART	Experimental	Comunicador de campo HART 475.
Aplicación de presión y toma de datos	Experimental	Bomba manual de calibración para inyectores diésel. Comunicador HART. Multímetro.
Análisis y validación de resultados	Experimental	Tablas de datos. graficas presión corriente.

4.3. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación desarrollada es de tipo experimental aplicada debido a que se ejecutaron pruebas prácticas sobre un transmisor de presión real bajo condiciones controladas. El diseño experimental permitió manipular la variable de entrada (presión aplicada) y observar su efecto sobre las variables de salida (corriente analógica y variables digital PV).

El estudio se desarrolló en laboratorio, asegurando:

- Control de presión aplicada
- Estabilidad de alimentación eléctrica
- Registro repetible de datos
- Condiciones ambientales constantes.

4.4. DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental fue diseñado para reproducir el funcionamiento real de un transmisor de presión industrial bajo condiciones controladas de laboratorio. El diseño contempla tres subsistemas principales.

- Sistema hidráulico de generación de presión.
- Sistema eléctrico de lazo corriente de 4-20 mA.
- Sistema de comunicación digital mediante protocolo HART.

Cada subsistema fue implementado con el propósito de permitir el análisis completo del funcionamiento interno del transmisor inteligente.

4.5. SISTEMA HIDRÁULICO DE GENERACIÓN DE PRESIÓN

4.5.1. Selección de la bomba

Para la generación de presión se utilizó una bomba manual de calibración de inyectores diésel, adaptado al sistema experimental. Esta decisión se tomó debido a la disponibilidad del equipo y a su capacidad para generar presión de forma progresiva y controlada.

Aunque no se trata de una bomba patrón industrial de calibración específica para transmisores, su funcionamiento manual permite:

- Control gradual de presión
- Estabilidad en los puntos de medición
- Repetibilidad en las pruebas.

4.5.2. Plano de diseño mecánico del sistema hidráulico

El sistema hidráulico fue diseñado para permitir la aplicación controlada de presión al transmisor.

Para la generación de presión se utilizó una bomba manual de calibración para inyectores diésel, adaptada para el proyecto. La conexión entre la bomba y el transmisor se realizó mediante accesorios de acero inoxidable, incluyendo:

- 1 conexión tipo T
- 2 válvulas de paso
- 3 niples roscados
- 2 acoples rápidos
- 2 líneas de desfogue
- 1 manguera de presión hidráulica
- 2 bases metálicas de soporte

La configuración incluye:

- Línea principal hacia el transmisor
- Línea de retorno hacia la bomba
- Línea de desfogue hacia recipiente externo

Disposición permitió controlar adecuadamente la presión y garantizar seguridad durante la liberación del fluido. Figura 4.1 Sistema hidráulico adaptado con bomba manual

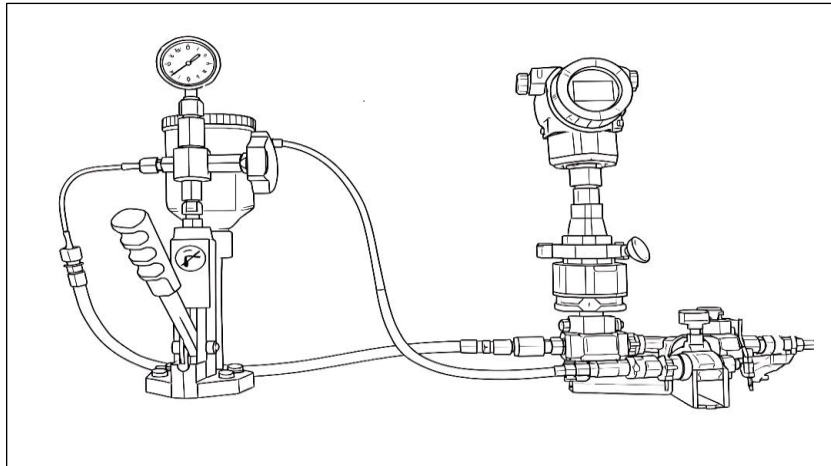


Figura 4.1. Plano del sistema Hidráulico.

4.5.3. Selección del fluido hidráulico

Se utilizó de refrigerante azul como fluido de transmisión de presión. La selección del fluido se realizó considerando:

- Reducción del riesgo de corrosión
- Protección de conexiones metálicas
- Buena estabilidad volumétrica.

4.6. PLANO DE DISEÑO ELÉCTRICO DEL LAZO DE CORRIENTE

4.6.1. Configuración general

El transmisor fue conectado en un lazo de corriente de 4-20 mA alimentado por una fuente de 24 VDC.

El circuito eléctrico incluyó:

- Fuente 24 VDC
- Multímetro digital en serie
- Transmisor de presión
- Resistencia de 250 Ω (ohmios)
- Comunicador HART 475 conectado en paralelo

La resistencia de 250 Ω (ohmios) garantiza la correcta superposición de la señal digital HART sobre la señal analógica. Figura 4.2 Diagrama eléctrico de lazo 4-20 mA con protocolo HART.

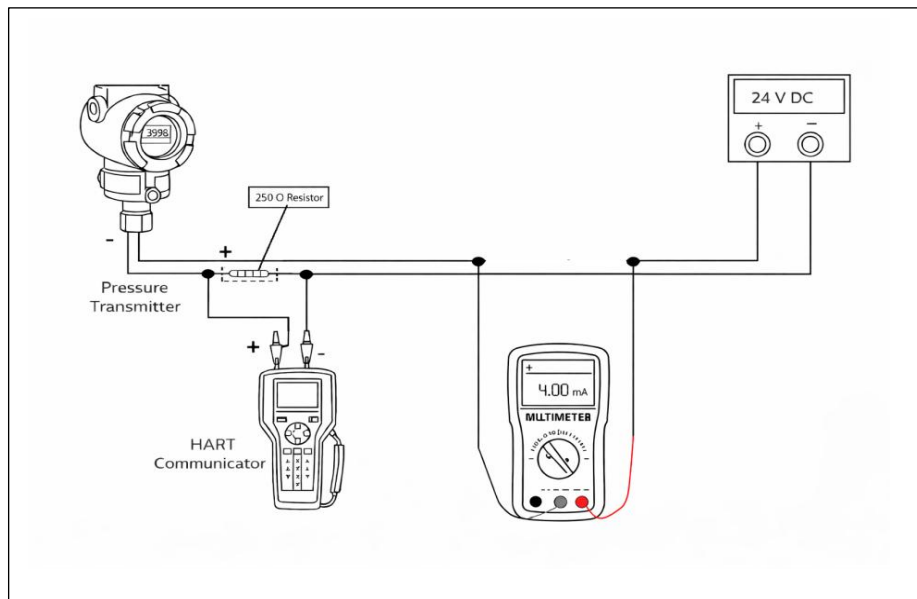


Figura 4.2. Diagrama eléctrico de lazo de 4-20 mA.

4.6.2. Especificaciones técnicas de los equipos

La Tabla 4.2 detalla las especificaciones técnicas del transmisor, incluyendo parámetros clave como rango de salida y alimentación, necesarios para su correcta calibración y funcionamiento en el proceso.

Tabla 4.2. Especificaciones del transmisor

Parámetro	Valor
Tipo	Inteligente con HART
Salida	4-20 mA
Alimentación	24 VDC
Precio nominal	± 0.5 % FS

Las características del multímetro, incluyendo su resolución y rango de medición, se describen en la Tabla 4.3, garantizando la precisión en las mediciones durante las verificaciones.

Tabla 4.3. Especificaciones del Multímetro

Parámetro	Valor
Tipo	Digital
Rango de corriente	0-20 mA
Resolución	0.01 mA

La Tabla 4.4 presenta las especificaciones técnicas de la fuente de alimentación, asegurando la estabilidad y precisión del suministro eléctrico durante las pruebas de calibración.

Tabla 4.4. Especificaciones de la fuente

Parámetro	Valor
Tensión	24 VDC
Regulación	± 0.5 V

4.7. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

4.7.1. Variables independientes

- Presión aplicada (P)

4.7.2. Variables dependientes

- Corriente de salida (I)
- Variable digital PV
- Error porcentual

4.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5 Diagrama de flujo del procedimiento experimental para la calibración del transmisor de presión mediante comunicación HART.

El diagrama de flujo presenta la secuencia de actividades realizadas durante el proceso de calibración del transmisor de presión. Se inicia con la inspección del equipo y la conexión del sistema de calibración, seguido del establecimiento de la comunicación con el comunicador HART 475. Posteriormente se aplican diferentes valores de presión dentro del rango de operación del transmisor, registrando la señal de salida correspondiente. Finalmente, los valores obtenidos se comparan con los valores teóricos para determinar si el error se encuentra dentro del límite permitido; en caso contrario, se realizan los ajustes de cero y span hasta obtener resultados aceptables.

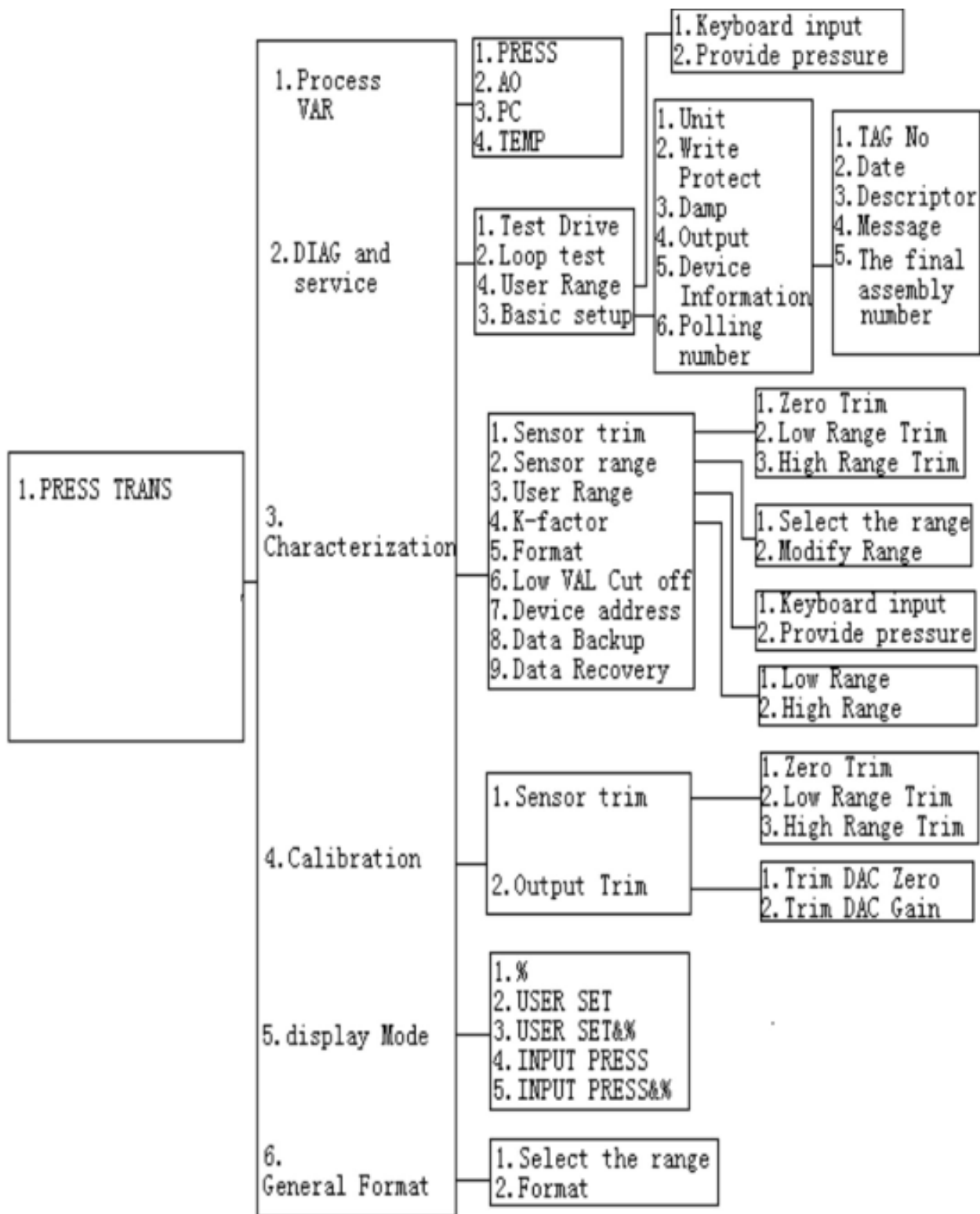


Figura 4.3 Diagrama del flujo del Comunicador de campo HART 475

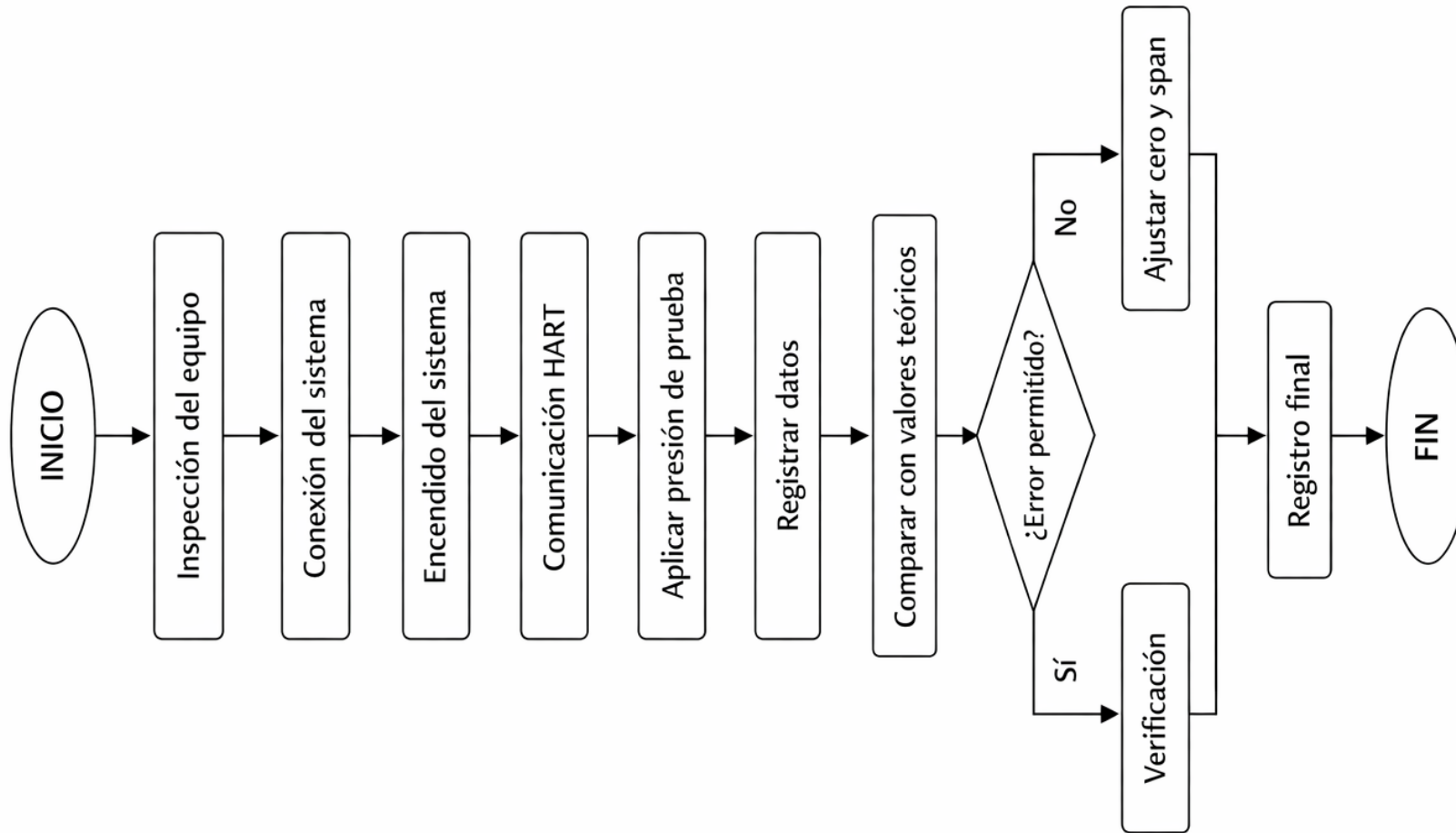


Figura 4.4. Diagrama del flujo del procedimiento

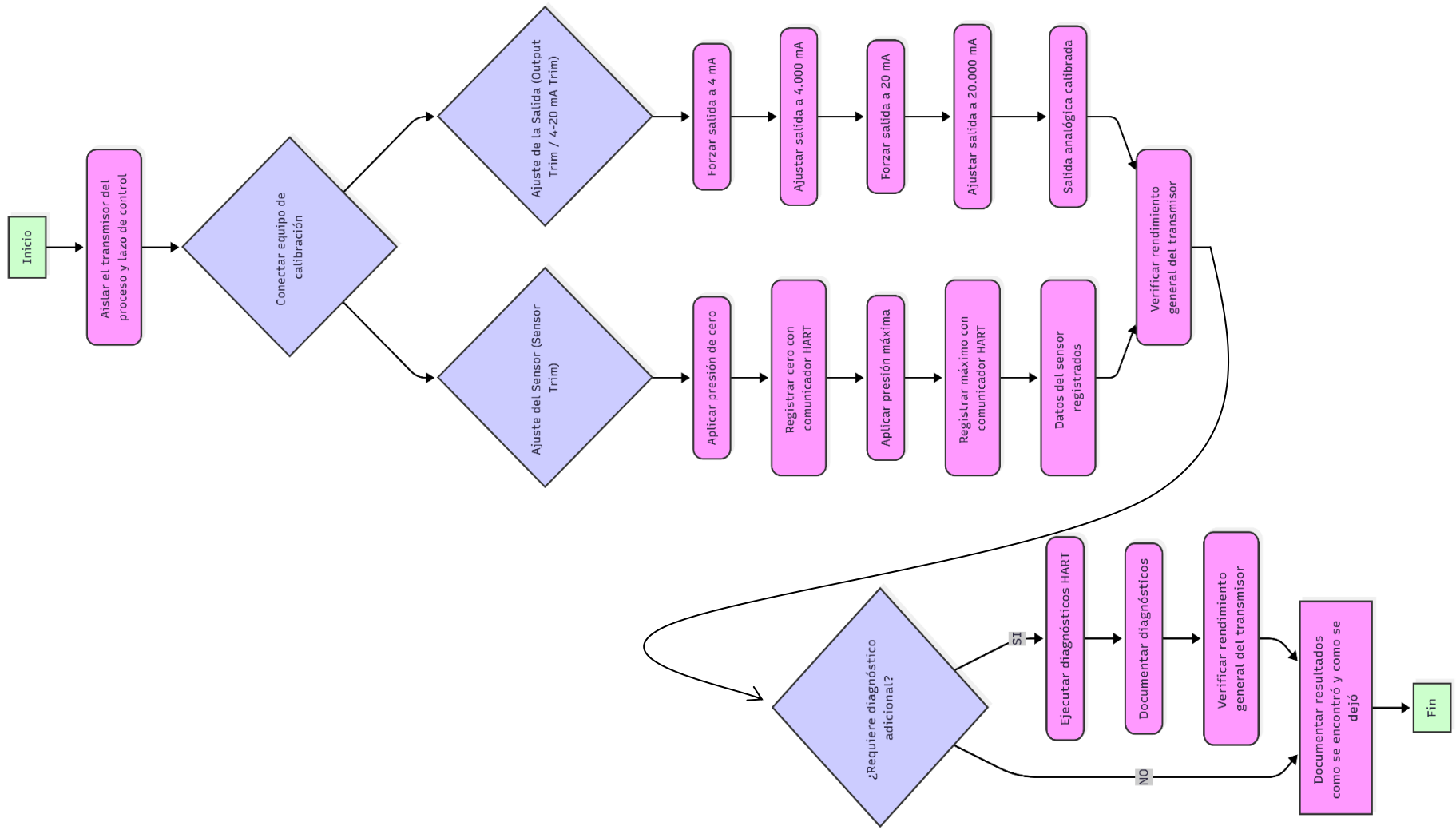


Figura 4.5 Diagrama de flujo experimental

4.8.1. Fuente de 24 VDC

El transmisor es alimentado mediante una fuente de corriente continua de 24 VDC, valor estándar en instrumentación industrial. Esta fuente energizó el lazo de corriente de 420 mA garantizando el correcto funcionamiento del transmisor durante el proceso de calibración.

La figura 4.3. Fuente de alimentación de 24 VDC utilizada en lazo de corriente.



Figura 4.6. Fuente de alimentación de 24 VDC al transmisor

4.8.2. Comunicador de campos HART 475

El comunicador de campo HART 475 se utiliza para establecer comunicación directa con el transmisor, este dispositivo permite visualizar la variable de proceso, acceder a los registros



Figura 4.7. Comunicador de campo HART 475

internos del equipo y ejecutar ajustes de calibración como el LRV, URV, Zero Trim y Span trim. En la Figura 4.4. Comunicador de campo HART 475 empleados en el proceso de calibración.

4.8.3. Multímetro digital

El multímetro digital se conecta en serie en el lazo de corriente para medir la señal de salida del transmisor en miliamperios. Esta medición permite verificar la correspondencia entre la presión aplicada y la corriente generada en la salida analógica.

Figura 4.5. Medición de corriente 4-20 mA mediante multímetro digital.

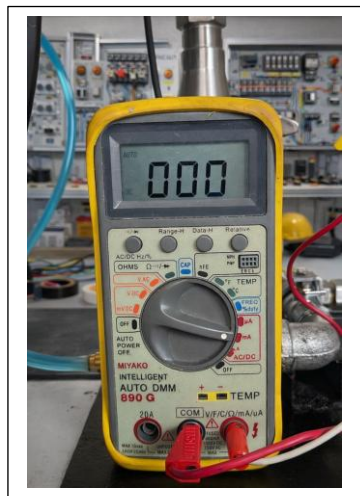


Figura 4.8. Medición de corriente 4-20 mA. Con multímetro digital UNI-T modelo UT39C

4.8.4. Preparación del sistema

- Verificación de conexiones hidráulicas
- Verificación de colecciones eléctricas
- Energización del sistema
- Restablecimiento de comunicador

4.8.5. Aplicación de presión

- Se aplicaron cinco puntos distribuidos en el rango
- 0%, 25%, 50%, 75% y 100%
- Cada punto estabilizó antes de registrar datos

4.8.6. Registro de datos

- Para cada punto se registraron:
- Presión aplicada
- PV digital
- Corriente medida
- Corriente teórica

4.9. MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA

El montaje experimental integra todos los elementos del sistema de calibración la bomba manual de inyectores a diésel se conecta al transmisor mediante mangueras, acoples, válvulas de paso, mientras que el transmisor se alimenta con una fuente de 24 VDC formando un lazo de corriente de 4-20 mA. El multímetro se instala en serie en polaridad positiva de la fuente para medir la corriente de salida y el comunicador HART 475 se conectan en paralelo con la resistencia en polaridad negativa de la fuente para comunicación digital. Este montaje permite evaluar simultáneamente el comportamiento físico del sensor el procesamiento interno del transmisor y la señal analógica de salida. Figura 4.6. Montaje experimental completo para la calibración del transmisor represión mediante protocolo HART.

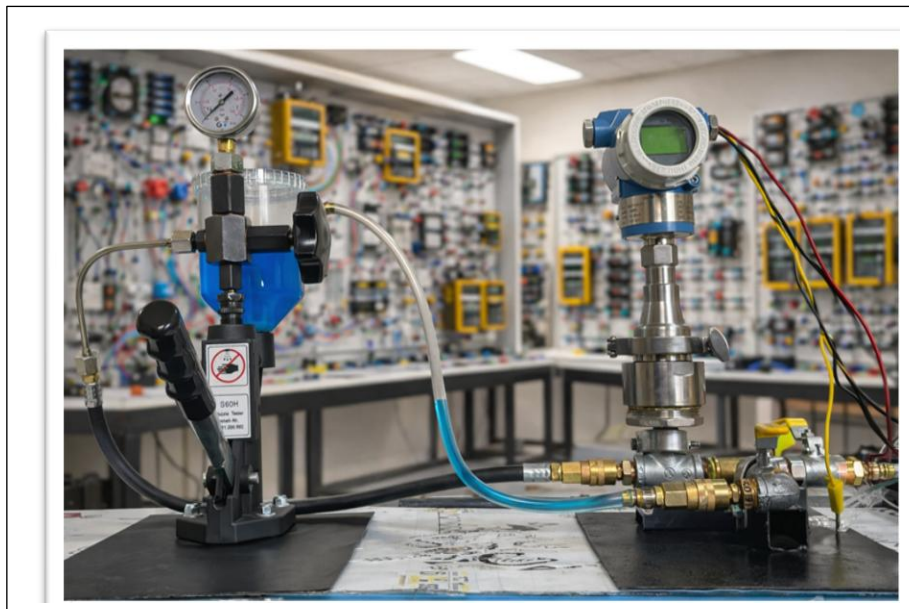


Figura 4.9. Montaje completo para calibración del transmisor de presión.

4.10. PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN

4.10.1. Verificación inicial del sistema (As Found)

Antes de realizar cualquier ajuste, se verifique el estado inicial del transmisor aplicado distintos valores de presión y registrando la corriente de salida. Estos valores permiten identificar desviaciones iniciales en la medición.

4.10.2. Aplicación del proceso físico (transmisor)

Para evaluar el comportamiento del transmisor de presión se realizaron pruebas de verificación en cinco puntos distribuidos a lo largo del rango de medición del instrumento: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la escala.

Esta distribución permite analizar el desempeño del transmisor en diferentes zonas del rango operativo, facilitando la identificación de posibles desviaciones en la medición. El punto correspondiente al 0 % permite verificar el error de cero del instrumento, mientras que los puntos intermedios (25 %, 50 % y 75 %) permiten analizar la linealidad del transmisor dentro del rango de medición. Finalmente, el punto correspondiente al 100 % permite evaluar el comportamiento del instrumento en el límite superior del rango, conocido como error de fondo de escala o Span.

La verificación del instrumento se realizó en cinco puntos distribuidos a lo largo del rango de medición, siguiendo las prácticas recomendadas en procedimientos de calibración de instrumentación industrial [2].

4.10.3. Conversión analógica-digital (A/D)

La señal analógica generada por el sensor es convertida a formato digital por el convertidor interno del transmisor. Esta etapa se evalúa accediendo a las variables del proceso (PV) mediante el comunicador HART 475.

4.10.4. Procesamiento digital de la señal

El microprocesador de transmisor realiza compensaciones internas y aplica a los parámetros de calibración configurados. En esta fase se ajustan valores como LRV y URV utilizando el comunicador de campo HART 475.

Durante la operación continua de los transmisores de presión pueden presentar desviaciones en la medición debido a diversos factores asociados al funcionamiento del sensor y a las condiciones de operación. Entre estos factores se encuentran el desgaste mecánico del elemento

sensor, variaciones térmicas, envejecimiento de los componentes electrónicos y posibles pérdidas de linealidad en el sistema de conversión de señal.

Estas condiciones pueden generar desplazamientos en el punto de referencia del instrumento, provocando errores en la medición de la variable de proceso. Por esta razón, los procedimientos de calibración permiten detectar y corregir dichas desviaciones mediante ajustes en los parámetros internos del transmisor.

4.10.5. Conversión digital analógica (D/A)

La señal digital procesada es convertida nuevamente en una corriente de 4-20 mA. La corriente resultante se mide con el multímetro para verificar la correspondencia con la presión aplicada.

4.10.6. Ajuste final del transmisor (As Left)

Una vez realizado los ajustes, se repite el procedimiento de medición para comprobar que el transmisor cumple con los valores esperados dentro del margen de error aceptables.

4.11. MÉTODO DE CÁLCULO

4.11.1. Corriente teórica

Para determinar la corriente teórica correspondiente a cada valor de presión aplicada, se utilizó la relación lineal del transmisor de presión entre la variable de proceso y la señal de salida de 4–20 mA, la cual se expresa mediante la Ecuación (4.1)

$$I = 4 + 16 \left(\frac{P-LRV}{URV-LRV} \right) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

4.11.2. Error porcentual

Para determinar el porcentaje de error en la medición, se empleó la ecuación (Ec.4.2) de error porcentual, que se define como la relación entre la diferencia entre el valor medido y el valor teórico, dividida entre el valor teórico, multiplicada por 100. Esta ecuación se expresa como:

$$\text{Error (\%)} = \frac{I_{\text{medido}} - I_{\text{teorico}}}{I_{\text{medido}}} * 100 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

4.12. REPETIBILIDAD Y ESTABILIDAD

Cada punto fue medido tres veces para evaluar repetibilidad. Se calculó desviación máxima entre menciones.

4.13. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EXPERIMENTAL

Se consideraron como fuentes de incertidumbre:

- Resolución del Multímetro
- Variación manual en la aplicación de presión
- Estabilidad de la fuente

4.14. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

El transmisor fue considerado calibrado cuando:

- Error $< \pm 1 \%$
- Señal lineal
- Diferencia mínima entre PV e I

4.15. SEGURIDAD OPERATIVA

- Liberación controlada de presión
- Verificación de fugas
- Uso de fluido no corrosivo
- No superar presión máxima del transmisor

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Se analizaron e interpretan los resultados obtenidos durante la aplicación del procedimiento de calibración de un transmisor de presión el uso del protocolo HART. El análisis se realizó con el objetivo de evaluar la reducción del error de medición y el comportamiento del transmisor en sus diferentes etapas internas de procesamiento de señal.

Para ello se evaluó el funcionamiento del transmisor considerando tres etapas principales del sistema de medición: la conversión analógico–digital (A/D), el procesamiento digital de la señal y la conversión digital–analógica (D/A). Estas etapas permiten transformar la señal generada por el sensor de presión en una señal de salida analógica de 4–20 mA, la cual es utilizada en los sistemas de control industrial.

Los resultados experimentales se obtuvieron mediante la aplicación controlada de presión en cinco puntos distribuidos a lo largo del rango operativo del transmisor, correspondientes al 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la escala. Para cada punto se registraron la presión aplicada, la variable de proceso digital (PV), la corriente de salida medida en el lazo de corriente y el error porcentual correspondiente.

Para cada punto se registró:

- Presión aplicada mediante la bomba manual.
- Corriente medida mA con el multímetro digital.
- Valor digital PV leído mediante el comunicador HART 475.
- Corriente teórica calculada.
- Error porcentual calculado.

5.2. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Figura 5.1. Sistema completo de calibración implementado.

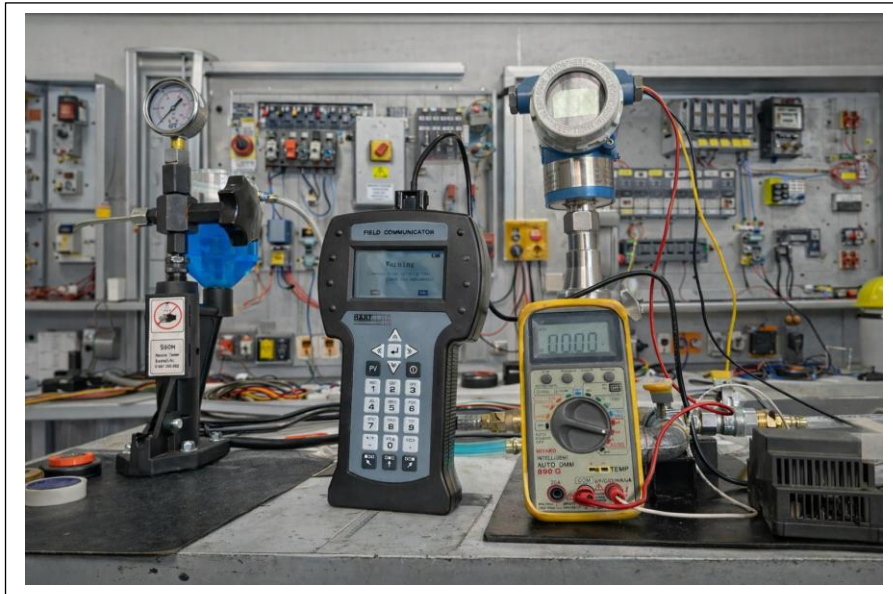


Figura 5.1. Sistema completo de calibración implementado

Esta imagen evidencia el montaje final utilizado para las pruebas experimentales. El prototipo de generador de presión fue diseñado para simular y controlar variaciones de presión en un sensor o transmisor de presión con comunicación HART. Este sistema utiliza refrigerante como fluido de trabajo y una bomba de presión manual o mecánica que permite incrementar o disminuir la presión dentro del circuito.

El funcionamiento del prototipo consiste en que la bomba impulsa el refrigerante a través de una línea conectada directamente al sensor de presión. Al accionar la bomba, se genera un aumento de presión dentro del sistema cerrado, lo que permite que el sensor detecte las variaciones del fluido y las convierta en una señal eléctrica proporcional, generalmente en un rango de 4 a 20 mA, la cual puede ser monitoreada mediante un multímetro o un comunicador HART.

Figura 5.2. Aplicación de presión mediante bomba manual.

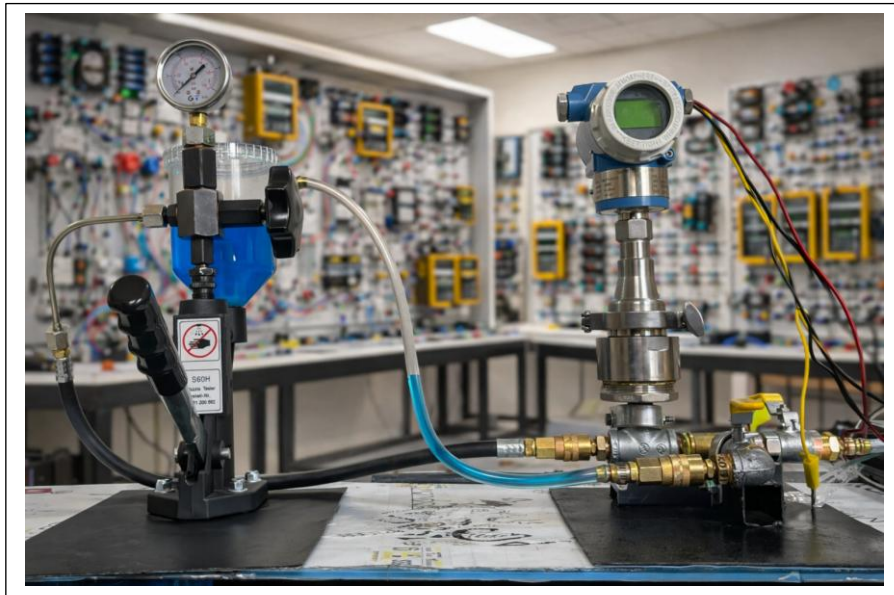


Figura 5.2. Bomba conectada al Transmisor

Se aplicó presión de forma progresiva y controlada utilizando la bomba manual adaptada al sistema hidráulico mediante una conexión en “T”, llaves de paso y líneas de desfogue.

Este prototipo permite simular condiciones reales de operación, facilitando la verificación, calibración y análisis del comportamiento del sensor de presión. Además, permite comprobar que el transmisor responda correctamente a los cambios de presión generados por la bomba, asegurando la confiabilidad de las mediciones dentro del sistema de instrumentación industrial.

Figura 5.3. medición de corriente en lazo 4-20 mA.

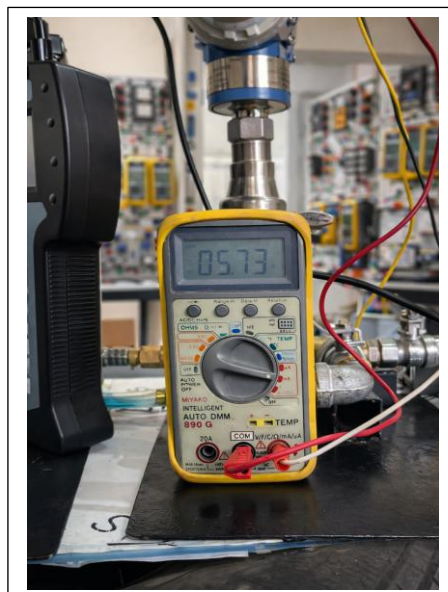


Figura 5.3. Medición del Multímetro digital UNI-T modelo UT39C

La corriente de salida fue medida conectando el multímetro digital en modo mA en serie con el conductor positivo de lazo de 24 VDC. En este procedimiento, el multímetro permitió comprobar la señal de salida del transmisor que trabaja con comunicación HART, midiendo la corriente en miliamperios (mA) dentro del lazo de corriente. Esta medición permitió confirmar que la señal analógica de 4–20 mA generada por el dispositivo corresponde correctamente a los valores del proceso, garantizando así el correcto funcionamiento y la confiabilidad de la transmisión de datos.

Figura 5.4. Lectura digital mediante comunicador HART 475



Figura 5.4. Comunicador mostrando la variable PV

El comunicador permitió verificar en tiempo de las variables digitales interna del transmisor. Que permite establecer comunicación digital con los transmisores de campo. Mediante este dispositivo es posible verificar, monitorear y validar los datos del instrumento, como variables de proceso, parámetros de configuración y estado del equipo. Gracias a esta comunicación, el comunicador HART facilita la comprobación de que el transmisor esté funcionando correctamente y que los valores medidos sean coherentes con las condiciones reales del proceso

5.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO INICIAL DEL TRANSMISOR

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 5.1, el transmisor presenta desviaciones en diferentes puntos del rango de medición, evidenciándose un incremento progresivo del error a medida que aumenta la presión aplicada. Esta situación sugiere la presencia de un desajuste en los parámetros de calibración del instrumento.

Las diferencias observadas entre la presión aplicada y la variable de proceso digital indican posibles desviaciones en la etapa de **conversión analógica–digital (A/D)** del transmisor. Estas desviaciones se reflejan posteriormente en la señal analógica de salida del instrumento, generando errores acumulativos en la etapa de **conversión digital–analógica (D/A)**.

El incremento del error hacia el límite superior del rango también puede asociarse a un desajuste en el parámetro de **Span**, lo cual afecta la pendiente de la curva de calibración del transmisor.

5.4. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

El transmisor fue configurado con:

LRV = 0 psi

URV = 100 psi

- La ecuación teórica fue

$$I = 4 + 16 \left(\frac{P-LRV}{URV-LRV} \right) \quad (5.1)$$

- Como LRV = 0 y URV =100:

$$I = 4 + 16 \left(\frac{P}{100} \right) \quad (5.2)$$

5.5. RESULTADOS DEL ESTADO DEL TRANSMISOR ANTES DEL AJUSTE HART

Antes de realizar el proceso de calibración se registraron los valores de corriente de salida del transmisor para diferentes valores de presión aplicados. Los resultados obtenidos durante esta etapa de verificación inicial se presentan en la Tabla 5.1.

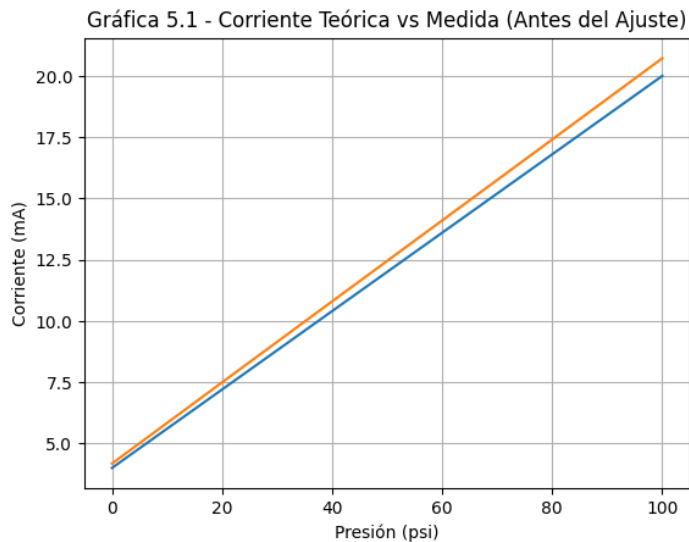
Tabla 5.1. Datos antes del ajuste HART

Presión (psi)	Corriente teórica (mA)	Corriente medida (mA)
0	4.00	4.18
25	8.00	8.32
50	12.00	12.45
75	16.00	16.58
100	20.00	20.72

Como se observa en la Tabla 5.1, los valores de corriente medidos presentan desviaciones con respecto a la corriente teórica esperada para cada punto de presión aplicado. Estas diferencias indican que el transmisor presentaba una desviación en su respuesta, lo que sugiere la presencia de errores asociados al ajuste del sensor o al rango de medición del instrumento.

5.6. ANÁLISIS GRÁFICO ANTES DEL AJUSTE

La Figura 5.1 muestra la relación entre la presión aplicada al transmisor y la corriente de salida registrada antes del proceso de calibración. En condiciones ideales, esta relación debe presentar un comportamiento lineal entre los valores de 4 mA y 20 mA correspondientes al rango de medición del instrumento. Sin embargo, en la gráfica se observa que algunos puntos experimentales se alejan de la línea teórica esperada, lo que evidencia desviaciones en la respuesta del transmisor. Estas diferencias indican la presencia de errores en la medición, posiblemente asociados al desplazamiento del punto cero o a variaciones en el ajuste del rango del instrumento. Esta condición confirma la necesidad de realizar un proceso de calibración para corregir dichas desviaciones



Gráfica 5.1. Corriente teórica vs corriente medida (Antes del ajuste)

Interpretación:

Se observa una desviación progresiva a medida que aumenta la presión aplicada. El error no es constante, lo que indica un desajuste tanto en etapa A/D como en la etapa D/A.

5.7. CÁLCULO DE ERROR PORCENTUAL ANTES DEL AJUSTE

Se utiliza la fórmula:

$$Error (\%) = \frac{I_{medido} - I_{teórico}}{I_{medido}} * 100 \quad (Ec. 4.5.3)$$

- Para 0%

$$Error (\%) = \frac{4.18-4}{16} * 100 = \mathbf{1.12\%} \quad (Ec. 4.5.4)$$

- Para 25%

$$Error (\%) = \frac{8.32-8}{16} * 100 = \mathbf{2\%} \quad (Ec. 4.5.5)$$

- Para 50%

$$Error (\%) = \frac{12.45-12}{16} * 100 = \mathbf{2.81\%} \quad (Ec. 4.5.6)$$

- Para 75%

$$Error (\%) = \frac{16.58-16}{16} * 100 = \mathbf{3.62\%} \quad (Ec. 4.5.7)$$

- Para 100%

$$Error (\%) = \frac{20.72-20}{16} * 100 = \mathbf{4.50\%} \quad (Ec. 4.5.8)$$

A partir de los datos registrados en la Tabla 5.1 se procedió a calcular el error porcentual del transmisor para cada punto de presión evaluado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Tabla de error antes del ajuste

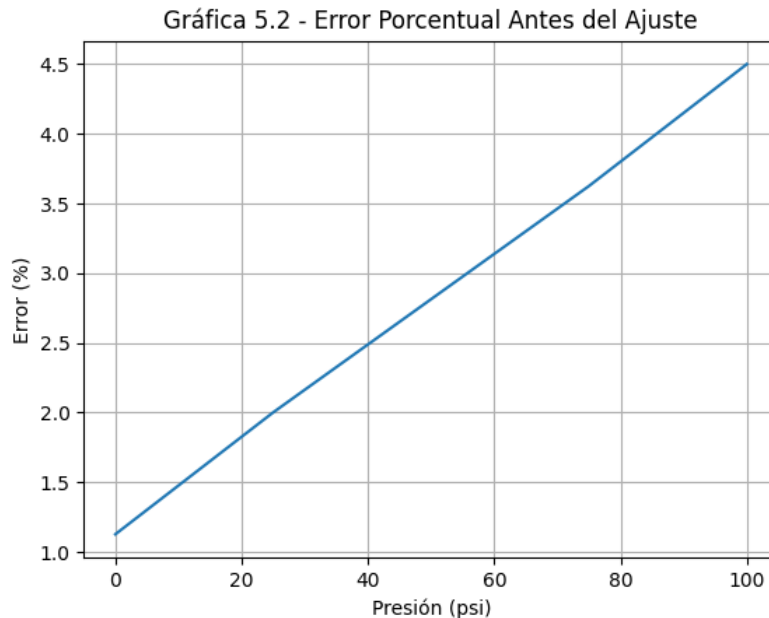
Presión	Error (%)
0	1.12 %
25	2.00 %
50	2.81 %
75	3.62 %
100	4.50 %

En la Tabla 5.2 se observa que el error del transmisor aumenta progresivamente a medida que se incrementa la presión aplicada. El valor máximo de error registrado corresponde aproximadamente al 4.5 % del fondo de escala, lo cual evidencia que el transmisor no se

encontraba correctamente calibrado antes de aplicar el procedimiento mediante protocolo HART.

5.8. ERROR PORCENTUAL ANTES DEL AJUSTE

La Gráfica 5.2 muestra el comportamiento del error porcentual del transmisor en los diferentes puntos del rango de medición antes de realizar el proceso de calibración. En la gráfica se observa que el error aumenta progresivamente a medida que se incrementa la presión aplicada, lo que indica una desviación en la respuesta del instrumento. En los puntos cercanos al extremo superior del rango se registran errores cercanos al **5 % del fondo de escala**, lo cual evidencia una pérdida de precisión en la medición de la variable de presión. Este comportamiento puede estar relacionado con el desgaste del sensor o con desajustes en los parámetros internos del transmisor.



Gráfica 5.2. Error porcentual Antes del Ajuste

El error muestra tendencia creciente. Esto evidencia un problema del Span posible delimitación del sensor interno.

5.9. APLICACIONES DE PROCEDIMIENTO HART

Se realizaron los siguientes ajustes:

- Zero Trim
- Span Trim
- Verificación de LRV y URV
- Confirmación de linealidad digital

El ajuste fue ejecutado directamente desde el comunicador HART 475 accediendo al menú de calibración.

5.10. DATOS DESPUÉS DEL AJUSTE HART

Posteriormente se realizó el ajuste del transmisor utilizando el comunicador de campo HART mediante las funciones Zero Trim y Span Trim, con el objetivo de corregir las desviaciones detectadas durante la verificación inicial. Los resultados obtenidos después del ajuste se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos después del ajuste HART

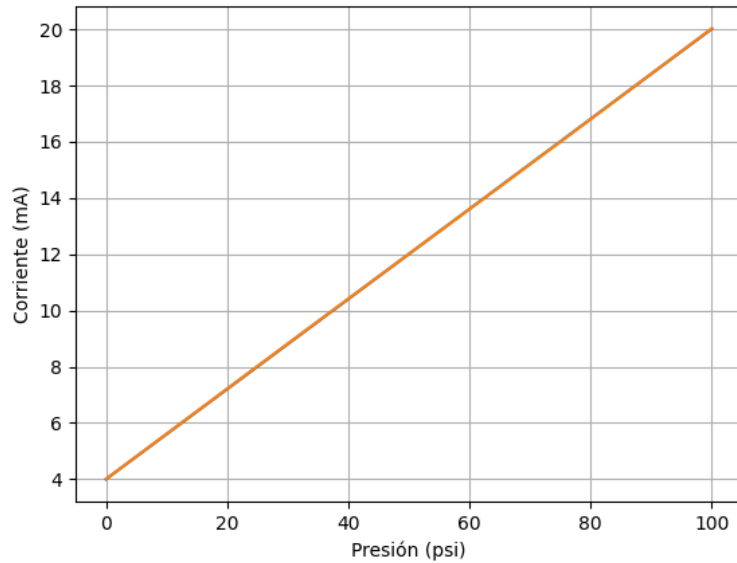
Presión	Corriente teórica (mA)	Corriente medida (mA)
0	4.00	4.02
25	8.00	8.02
50	12.00	12.01
75	16.00	15.99
100	20.00	20.01

Como se observa en la Tabla 5.3, los valores de corriente medidos presentan una mayor correspondencia con los valores teóricos esperados. Esto indica que el procedimiento de calibración permitió corregir las desviaciones detectadas previamente en la señal de salida del transmisor.

5.11. ANÁLISIS GRÁFICO DESPUÉS DEL AJUSTE

La Gráfica 5.3 presenta la relación entre la presión aplicada y la corriente de salida del transmisor después de realizar el proceso de calibración mediante el protocolo HART. En esta gráfica se observa que los valores experimentales se aproximan de manera más precisa a la línea teórica esperada del transmisor. Esto indica que la correspondencia entre la variable de presión aplicada y la señal de salida ha mejorado notablemente. La reducción de las desviaciones entre los valores medidos y los valores teóricos evidencia que los ajustes realizados mediante Zero Trim y Span Trim permitieron corregir los errores detectados en el instrumento. Como resultado, el transmisor presenta una respuesta más lineal dentro de su rango de operación.

Gráfica 5.3 - Corriente Teórica vs Medida (Después del Ajuste)



Gráfica 5.3. Corriente teórica vs corriente medida (Después del ajuste)

Interpretación:

Se observa coincidencia casi exacta entre valores teóricos y medidos. La linealidad del transmisor mejora notablemente.

5.12. ERROR PORCENTUAL DESPUÉS DEL AJUSTE

Se utiliza la fórmula:

$$Error (\%) = \frac{I_{medido} - I_{teórico}}{16} * 100 \quad (Ec. 4.5.9)$$

- Para 0%

$$Error (\%) = \frac{4.01 - 4}{16} * 100 = \mathbf{0.06\%} \quad (Ec. 4.5.10)$$

- Para 25%

$$Error (\%) = \frac{8.02 - 8}{16} * 100 = \mathbf{0.12\%} \quad (Ec. 4.5.11)$$

- Para 50%

$$Error (\%) = \frac{12.01 - 12}{16} * 100 = \mathbf{0.06\%} \quad (Ec. 4.5.12)$$

- Para 75%

$$Error (\%) = \frac{15.99 - 16}{16} * 100 = \mathbf{-0.06\%} \quad (Ec. 4.5.13)$$

- Para 100%

$$Error (\%) = \frac{20.02-20}{16} * 100 = \mathbf{0.12\%} \quad (\text{Ec. 4.5.14})$$

A partir de los datos obtenidos después del ajuste se calcularon nuevamente los errores porcentuales del transmisor para cada punto del rango de presión evaluado. Los resultados se presentan en la Tabla 5.4.

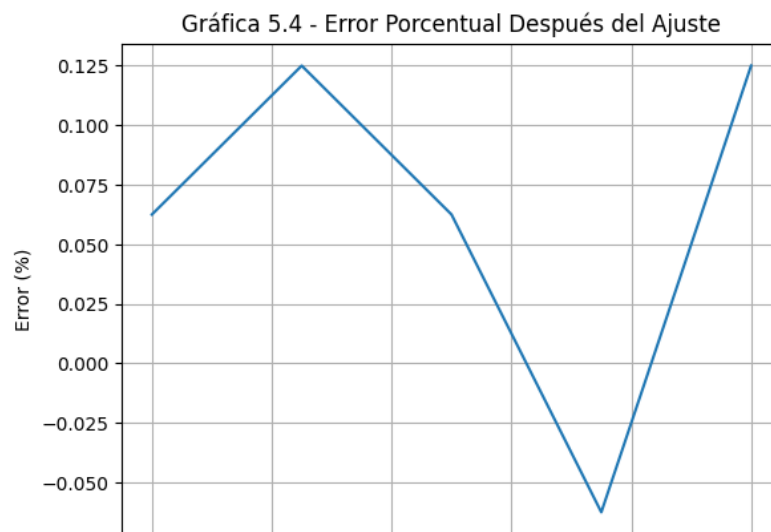
Tabla 5.4. Error porcentual después del ajuste

Presión	Error (%)
0	0.06
25	0.12
50	0.06
75	-0.06
100	0.12

En la Tabla 5.4 se puede observar que el error porcentual del transmisor se reduce considerablemente en todos los puntos de medición, manteniéndose cercano a $\pm 0.12\%$, lo que indica una mejora significativa en la precisión del instrumento después de realizar el ajuste mediante protocolo HART.

5.13. ERROR PORCENTUAL DESPUES DEL AJUSTE

La Gráfica 5.4 presenta el error porcentual del transmisor después de realizar el procedimiento de calibración utilizando el comunicador de campo HART. En comparación con la gráfica



Gráfica 5.4. Error porcentual después del ajuste

anterior, se observa una reducción considerable en los valores de error registrados en todos los puntos del rango de medición. Los resultados muestran que el error máximo se redujo a valores inferiores al 0.2 % del fondo de escala, lo que indica una mejora significativa en la precisión del instrumento. Este resultado demuestra que el procedimiento de calibración permitió corregir las desviaciones detectadas durante la verificación inicial del transmisor.

El error se reduce notoriamente, manteniéndose dentro de los valores aceptables para instrumentación industrial.

5.14. COMPARACIÓN GLOBAL

Finalmente, se realizó una comparación entre el error máximo registrado antes y después del proceso de calibración. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Comparación global

Condición	Error Máximo
Antes HART	4.5 %
Después HART	0.12 %

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 5.5, el error máximo del transmisor se redujo de 4.5 % antes del ajuste a aproximadamente 0.12 % después del ajuste, lo que demuestra que el procedimiento de calibración mediante protocolo HART permitió mejorar la precisión y confiabilidad del instrumento.

- Reducción del error:

$$\frac{4.5-0.12}{4.5} * 100 = 97.3\% \quad (5.15)$$

Se obtuvo una reducción aproximadamente del 97% del error. La coincidencia entre presión aplicada y PV digital confirma la correcta calibración de la etapa A/ D. Asimismo, la linealidad de la corriente valida el correcto funcionamiento del convertidor D/A.

5.15. VERIFICACIÓN DEL RANGO OPERATIVO DEL TRANSMISOR

En la tabla 5.6 verificamos que el transmisor empleado posee un rango nominal máximo de 10 bar Considerando la equivalencia:

- 1 bar =14.5 PSI
- 10 bar ≈145 PSI

El manómetro de la bomba manual tiene un rango máximo de 150 PSI lo que permite cubrir completamente el rango operativo del transmisor.

En consecuencia, las pruebas realizadas abarcan el 100% del rango nominal del instrumento, garantizando la validez del procedimiento de calibración aplicado.

Tabla 5.6 Comparación de rangos

Elemento	Rango
Transmisor	0 - 10 bar (\approx 145 PSI)
Manómetro	0 - 150 PSI
Cobertura	100 %

5.16. DISCUSIÓN TÉCNICA

Los resultados Demuestran que el uso del Protocolo HART permite detectar y corregir desviaciones internas del transmisor que no pueden identificarse únicamente mediante la observación de la señal 4-20 mA Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación del procedimiento de calibración mediante el protocolo HART permite reducir significativamente el error de medición del transmisor de presión.

Antes del proceso de calibración se observaron desviaciones progresivas en la señal de salida del transmisor, lo cual indicaba la presencia de errores en los parámetros internos del instrumento. Posteriormente, mediante la aplicación de los ajustes de **Zero Trim y Span Trim**, se logró corregir dichas desviaciones y mejorar la correspondencia entre la presión aplicada y la señal de salida del transmisor.

Estos resultados demuestran que el uso del protocolo HART permite acceder a la información interna del instrumento y realizar ajustes más precisos en los parámetros de calibración, lo cual contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema de medición.

La reducción del error y la mejora de la linealidad validan la eficacia del procedimiento desarrollado.

Además, muestran que:

- La calibración tradicional basada únicamente en corriente no permite visualizar errores internos.
- El Protocolo HART Permite acceder a la variable digital interna (PV).
- La corrección de Zero y Span impacta directamente a la linealidad.

- La validación simultánea A/D y D/A mejora la precisión global.

El procedimiento desarrollado evidencia que la aplicación del Protocolo HART influye directamente en la reducción de error de medición del transmisor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un procedimiento de calibración para transmisores de presión mediante el uso del protocolo HART, el cual permitió evaluar el comportamiento del instrumento en diferentes puntos del rango de medición. La verificación del transmisor se realizó en cinco puntos del rango operativo (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %), lo que permitió analizar la linealidad y exactitud del instrumento a lo largo de todo su rango de operación.
- Durante la verificación inicial del transmisor se identificó desviaciones entre la presión aplicada y la señal de salida del instrumento. Estas desviaciones evidenciaron la presencia de errores asociados al ajuste de cero y al ajuste de rango del transmisor.
- Tras la implementación del procedimiento de calibración mediante el comunicador de campo HART 475, se realizó los ajustes correspondientes de Zero Trim y Span Trim, lo que permitió reducir el error de medición a valores ± 1 %. Este resultado evidencia una mejora en la correspondencia entre la presión aplicada y la señal de salida del transmisor.
- Finalmente, el uso del protocolo HART permitió acceder a los parámetros internos del transmisor y realizar ajustes de calibración directamente en el instrumento. Esto facilita el diagnóstico de desviaciones en la medición y contribuye a mejorar la exactitud y confiabilidad de los sistemas de medición de presión utilizados en procesos industriales.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en aplicaciones industriales reales se utilicen equipos patrón certificados y con trazabilidad metrológica, especialmente cuando se requiera realizar calibraciones en rangos de presión elevadas o en procesos críticos donde la exactitud sea determinante para la seguridad operativa.

- Es aconsejable implementar procedimientos de calibración periódicos utilizando comunicación digital HART, ya que esta tecnología permite detectar desviaciones internas del transmisor antes de que generen errores significativos en el proceso.
- Se recomienda integrar sistemas de adquisición de datos automatizados para registrar simultáneamente la presión aplicada, la variable digital (PV) y la corriente del lazo 4–20 mA, lo que permitiría obtener análisis estadísticos más detallados y mejorar la precisión en la evaluación del error.

7. REFERENCIAS

- [1] “Anexo 9. Códigos Unesco.”
- [2] J. P. Bentley, *Principles of measurement systems*, 4. ed., [Nachdr.]. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [3] S. E. N. America, “4-20mA Pressure Transmitters,” SUCO ESI North America. <https://sucoesi.com/4-20ma-pressure-transmitters/>
- [4] T. R. Kuphaldt, “Lessons In Industrial Instrumentation,” *Version 0.2– Released September 29, 2008*, p. 655.
- [5] “Highway Addressable Remote Transducer Protocol,” 2025. Accessed: Jan. 25, 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Highway_Addressable_Remote_Transducer_Protocol&oldid=1314605957
- [6] A. E. M. Digital, “Hart,” SMAR Technology Company. Accessed: Jan. 25, 2026. [Online]. Available: <https://www.smar.com.br/hart>
- [7] G. K. McMillan and D. M. Considine, Eds., *Process/industrial instruments and controls handbook*, 5th ed. in McGraw-Hill’s AccessEngineering. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [8] “International Society of Automation (ISA).” Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.isa.org/>
- [9] S. E. O. Manager, “How to Calibrate Pressure Transmitter with HART 475,” Grupo BCST. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://bcstgroup.com/es/how-to-calibrate-pressure-transmitter-with-a-hart-475/>
- [10] A. Otero, W. de J. C. García, and I. Electrónico, “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMADOR DE TRANSMISORES DE PRESION HONEYWELL BASADO EN EL PROTOCOLO HART,” Dec. 2012. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/DISENO-E-IMPLEMENTACION-DE-UN-PROGRAMADOR-DE-DE-EN-Otero-Garc%C3%ADa/cad26e52d3706c949259f7df2c22aabc5b8537b6>
- [11] D. E. Tellez, A. B. López, E. C. Rodríguez, and J. R. Beltrán, “Arquitectura para transmisores HART de alta exactitud.”
- [12] R. T. Wintio, B. W. Dionova, and A. Yusuf, “Validation of Pressure Transmitter Input/Output Loop Testing Based on Hybrid Analog and Digital HART Communication,” vol. 21, no. 01, 2025.
- [13] “Ingebook - MODERN CONTROL SYSTEMS 14ED -”, Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: https://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB_BooksVis?cod_primaria=1000187&codigo_libro=14108
- [14] K. Ogata, “Ingeniería de control moderna,” 2015, p. 904, 2015.

- [15] “Manual de referencia: Transmisores de presión Rosemount 2088, 2090P y 2090F.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-de-referencia-transmisores-de-presi%F3n-rosemount-2088-2090p-y-2090f-es-es-78702.pdf>
- [16] “Current loop,” *Wikipedia*. Nov. 11, 2025. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Current_loop&oldid=1321582353
- [17] S. Iyalunaidu, “Smart Pressure Transmitter Sensor Trim Guide with Diagrams & Calibration Steps,” *Instrumentation and Control Engineering*. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://automationforum.co/smart-pressure-transmitter-sensor-trim-guide-with-diagrams-calibration-steps/>
- [18] “Calibration Procedure of Pressure Transmitters – Top 25 Interview Q&A – InstruNexus.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://instrunexus.com/calibration-procedure-of-pressure-transmitters-top-25-interview-qa/>
- [19] “Instrument_calibration.”
- [20] D. D. R. Janner, “The HART Communication Protocol”.
- [21] “Highway Addressable Remote Transducer (HART) Tutorial - Automation / DCS,” *INST ENG*, Jun. 2018, Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://insteng.com/t/highway-addressable-remote-transducer-hart-tutorial/4526>
- [22] “What Is a 4-20 mA Current Loop?” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/calibration/what-is-a-4-20-ma-current-loop>
- [23] “HART Fundamentals,” *Rheonics Support*. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://support.rheonics.com/en/support/solutions/articles/81000412287-hart-fundamentals>
- [24] “Hart 475 Communicator,” Grupo BCST. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://bcstgroup.com/es/product-hart-475-communicator.html>
- [25] S. Iyalunaidu, “Wiring Diagram for Pressure Transmitter Calibration in Workbench using HART,” *Instrumentation and Control Engineering*. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://automationforum.co/wiring-diagram-for-pressure-transmitter-calibration-in-workbench-using-hart/>
- [26] “HART | Grupo FieldComm.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: https://www.fieldcommgroup.org/technologies/hart?utm_source=chatgpt.com
- [27] Amazon, “Calibrador neumático manual de la bomba de la presión y del vacío (solo bomba manual) para laboratorios de calibración, calibración de campo y transmisor de presión Modelo: AI-DP1-2200 : Industrial y Científico.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Operated-Pneumatic-Calibrator-Calibration-Transmitter/dp/B0CP1Y5YRG?utm>
- [28] “Industrial power supply 24VDC 2.5A.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://cablematic.com/en/products/industrial-power-supply-24vdc-25a-VF024/>