



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD TECNOLÓGICA ENTRE
CALIBRADORES SECUNDARIOS HART DE GAMA BAJA Y ALTA CON
INSTRUMENTOS HART

Andrés Mauricio Gómez García
Juan Pablo Marín Ortiz

PROYECTO DE GRADO

Bucaramanga
2019



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD TECNOLÓGICA ENTRE
CALIBRADORES SECUNDARIOS HART DE GAMA BAJA Y ALTA CON
INSTRUMENTOS HART**

Andrés Mauricio Gómez García
Juan Pablo Marín Ortiz

PROYECTO DE GRADO

Presentado ante la Universidad Pontificia Bolivariana
como requisito para optar al título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

Realizado con la asesoría de:

Alex Alberto Monclou Salcedo, MSc.

**Bucaramanga
2019**

DEDICATORIA

A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi hermana y a Andrea Belén por su cariño y apoyo incondicional

A Juan Pablo, mi compañero de proyecto quien se convirtió en un gran amigo. Gracias por su apoyo y consejos.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos que durante todo el pregrado compartimos y cultivamos lindas vivencias.

Andrés Mauricio Gómez

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicárselo a Dios, a mis padres: Carlos Benjamín y Carmen Sofía que siempre han estado conmigo apoyándome y aconsejándome en todos mis proyectos tanto académicos como personales, son mi ejemplo a seguir y este trabajo es fruto de todos los valores y enseñanzas que me han dado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos: Carlos Andrés y María Alejandra quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y me dieron un consejo cuando más lo necesitaba.

A mi novia Laura Cañas quien se convirtió en un apoyo incondicional y siempre me dio una voz de aliento para seguir adelante, por su confianza y por motivarme cada día a superarme más.

A mi compañero de tesis Andrés Mauricio, que a lo largo de la carrera se convirtió en un verdadero amigo y compartimos valores como esfuerzo y dedicación, gracias por el compromiso en el desarrollo de este trabajo.

Por ultimo agradecer a todas las personas que influyeron en mi desarrollo profesional, este trabajo es fruto de los esfuerzos realizados a lo largo de la carrera.

Juan Pablo Marín Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Al Mag. Alex Monclou, por su orientación durante todo este tiempo y motivarnos constantemente durante el desarrollo del proyecto y por la gran confianza que nos brindó.

A Elizabeth Barajas por su colaboración, apoyo constante y disposición a resolver nuestras dudas en momentos necesarios.

Agradecemos a nuestros docentes de la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra preparación profesional.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Definición del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.4 Procedimiento	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Historia del protocolo HART	7
2.2 Definición	7
2.3 Características	8
2.3.1 Comunicación bidireccional	8
2.3.2 Nuevos tipos de información	8
2.3.3 Amplio suministro	9
2.4 Especificaciones	9
2.4.1 Actualizaciones	9
2.4.2 Modelo OSI	9
2.5 Funcionamiento	11
2.5.1 Modulación por desplazamiento de frecuencia	11
2.5.2 Modos de comunicación	13
2.6 Comandos protocolo HART	15
2.6.1 Comandos Universales	15
2.6.2 Comandos de práctica común	15
2.6.3 Comandos específicos	16
2.7 ventajas del protocolo HART	17
2.8 Configuración de dispositivos	17
2.8.1 Comunicadores universales portátiles	18
2.8.2 Configuración de dispositivos basadas en PC	19
2.9 Descripción del laboratorio	19
2.9.1 Espacio físico	20
2.9.2 Condiciones del lugar	21
2.9.3 Servicios industriales	21

2.10 Módulos del laboratorio	25
2.10.1 Módulo de presión	25
2.10.2 Módulo del banco de flujo	28
2.10.3 Módulo de nivel	30
CAPÍTULO 3: PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD	35
3.1 Prueba 1. Módulo de presión utilizando el calibrador secundario de gama alta	35
3.2 Prueba 2. Módulo de presión utilizando el calibrador secundario de gama baja	42
3.3 Prueba 3. Módulo del banco de flujo utilizando el calibrador secundario de gama alta	45
3.4 Prueba 4. Módulo del banco de flujo utilizando el calibrador secundario de gama baja	47
3.5 Prueba 5. Módulo de nivel utilizando el calibrador secundario de gama alta .	48
3.6 Prueba 6. Módulo de nivel utilizando el calibrador secundario de gama baja .	51
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXO A: GUÍA DE MÓDULO DE PRESIÓN	58
ANEXO B: GUÍA DE USO DEL CALIBRADOR GAMA ALTA ROSE-MONT 475.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Piramide CIM.	4
Figura 2.	Modelo OSI.	10
Figura 3.	Mensaje HART	11
Figura 4.	Modulación por desplazamiento de frecuencia..	12
Figura 5.	Método de modulación.	12
Figura 6.	Configuración Punto a Punto..	14
Figura 7.	Configuración Multipunto..	14
Figura 8.	Comunicador portátil HART.	18
Figura 9.	Conexión de un PC a un dispositivo HART..	19
Figura 10.	Entrada laboratorio instrumentación electrónica.	20
Figura 11.	Servicio de Agua	22
Figura 12.	Servicio de energía.	22
Figura 13.	Servicio de internet.	23
Figura 14.	Suministro de energía auxiliar.	23
Figura 15.	Servicio de aire acondicionado central.	24
Figura 16.	Sistema de iluminación.	25
Figura 17.	Módulo de presión.	26
Figura 18.	Transmisor SMAR LD301..	27
Figura 19.	Transmisor SMAR LD291..	28
Figura 20.	Módulo del banco de flujo..	29
Figura 21.	Caudalimetro Promag 50 Endress & Hauser1..	29
Figura 22.	Módulo de nivel.	30
Figura 23.	Transmisor Endress & Hauser Deltapilot M FMB50.	31
Figura 24.	Transmisor Endress & Hauser Micropilot FMR51.	32
Figura 25.	Transmisor Endress & Hauser Levelflex FMP52.	33
Figura 26.	Transmisor Endress & Hauser Liquicap M FM151.	34
Figura 27.	Arreglo de resistencias para la salida del protocolo HART para los transmisores LD301 y LD291..	36
Figura 28.	Inicio del comunicador de campo Rosemount 475..	36
Figura 29.	Reconocimiento del transmisor LD301 en el comunicador de campo Rosemount 475.	37
Figura 30.	Tipo de comunicación por medio del protocolo HART..	37
Figura 31.	Menú del transmisor LD301..	38
Figura 32.	Display del transmisor LD301..	38

Figura 33.	Menú del rango y las unidad de medida del transmisor LD301.	39
Figura 34.	Menú del display del transmisor LD301.	39
Figura 35.	Menú de variables que se muestran en el display del transmisor LD301.	40
Figura 36.	Menú de variables que se muestran en el display del transmisor LD301.	40
Figura 37.	Display del transmisor LD301..	41
Figura 38.	Reconocimiento del transmisor LD291 en el comunicador de campo Rosemount 475.	41
Figura 39.	Menú del transmisor LD291..	42
Figura 40.	Menú del monitor del transmisor LD291..	42
Figura 41.	Reconocimiento del transmisor LD291 con el calibrador de gama baja..	43
Figura 42.	Interfaz del transmisor LD291.	44
Figura 43.	Interfaz de la ventana de rango del transmisor LD291.	44
Figura 44.	Interfaz de la ventana TRIM del transmisor LD291.	44
Figura 45.	Reconocimiento del transmisor LD301 con el transmisor de gama baja..	45
Figura 46.	Arreglo de resistencias del modulo del banco de flujo.	46
Figura 47.	Conexión del comunicador de campo Rosemount a la salida HART del transmisor Promag 50.	46
Figura 48.	Respuesta del barrido para reconocer el transmisor Promag 50.	47
Figura 49.	Barrido para comunicar el PC con el transmisor program 50.	47
Figura 50.	Listado de dispositivos compatibles de Endress&Hauser con el DDCON100.	
	48	
Figura 51.	Salida multipunto del protocolo HART en el modulo de nivel.	49
Figura 52.	Reconocimiento de los cuatro transmisores del modulo de nivel.	49
Figura 53.	Menú del transmisor Levelflex FMP52.	50
Figura 54.	Menú del transmisor Micropilot FMR51.	50
Figura 55.	Menú del transmisor Liquicap M FM151.	51
Figura 56.	Menú del transmisor Deltapilot M FMB50.	51
Figura 57.	Barrido y reconocimiento de los cuatro transmisores.	52
Figura 58.	Reconocimiento de los transmisores del módulo de flujo.	52
Figura 59.	Dispositivos en modo genérico.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comandos universales del protocolo HART.	15
Tabla 2.	Comandos de práctica común del protocolo HART	16

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

Bit	Señal digital que puede representar dos estados. 1 y 0 lógico.
Byte	Unidad de información digital formada usualmente por ocho bits.
CIM	Manufactura Integrada por computadora, por sus siglas en inglés <i>Computer Integrated Manufacturing</i>
FSK	Modulación por desplazamiento de frecuencia, por sus siglas en inglés <i>Frequency Shift Keying</i>
HART	Protocolo de comunicación industrial, por sus siglas en inglés Highway Addressable Remote Transducer
Mestro-Esclavo	Configuración en la comunicación entre dos dispositivos, la cual una estación puede iniciar peticiones y la otra responder
PC	Computador personal, por sus siglas en inglés <i>Personal computer</i>
SCADA	Concepto empleado para la visualización de un proceso que permite controlar y supervisar. <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD TECNOLÓGICA ENTRE CALIBRADORES SECUNDARIOS HART DE GAMA BAJA Y ALTA CON INSTRUMENTOS HART

AUTOR(ES): ANDRÉS MAURICIO GÓMEZ GARCÍA
JUAN PABLO MARÍN ORTIZ

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): ALEX MONCLOU

RESUMEN

En este trabajo se realiza el análisis de compatibilidad tecnológica entre dispositivos que manejan el protocolo de comunicación industrial Highway Addressable Remote Transducer y calibradores maestros secundarios de gama baja y gama alta que se encuentran en la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica. Se inicia una contextualización en el aspecto del protocolo de comunicación y en las características de los dispositivos que se van a analizar. Luego de esto se presentan las pruebas que se realizaron en cada dispositivo que se encuentran en los diferentes módulos del laboratorio. En la metodología utilizada se describe el proceso que se realizó para lograr este análisis. Con las pruebas realizadas se obtuvieron resultados del 100% de compatibilidad entre los dispositivos ubicados en el módulo de presión y los dos calibradores maestros secundarios. Los dispositivos involucrados en el módulo de nivel tuvieron 100% de compatibilidad con el calibrador maestro secundario de gama alta pero 0% de compatibilidad con el calibrador maestro secundario de gama baja. El dispositivo ubicado en el módulo de flujo obtuvo 0% de compatibilidad con ambos calibradores maestro secundario.

PALABRAS CLAVE:

HART, nivel, presión, flujo, transmisor, protocolo, compatibilidad

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL COMPATIBILITY BETWEEN SECONDARY AND HIGH-END HART SECONDARY CALIBRATORS WITH HART INSTRUMENTS

AUTHOR(S): ANDRÉS MAURICIO GÓMEZ GARCÍA
JUAN PABLO MARÍN ORTIZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: ALEX MONCLOU

ABSTRACT

In this work the analysis of technological compatibility between devices that handle the protocol of Highway Addressable Remote Transducer industrial communication and low-end and high-end secondary master calibrators found in the faculty of electrical and electronic engineering. A contextualization begins in the aspect of the communication protocol and in the characteristics of the devices to be analyzed. After this, the tests that were performed on each device found in the different modules of the laboratory are presented. The process used to achieve the analysis is described in the methodology used. With the tests performed, results were obtained that give 100% compatibility between the devices located in the pressure module and the two secondary master calibrators. The devices involved in the level module process had 100% compatibility with the high-end secondary master calibrator but 0% compatibility with the low-end secondary master calibrator. The device located in the flow module obtained 0% compatibility with both secondary master calibrators.

KEYWORDS:

HART, level, pressure, flow, transmitter, protocol, compatibility

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK



INTRODUCCIÓN

Las empresas dedicadas a los procesos como las de hidrocarburos, las industrias de alimentos, las de bebidas, etc. emplean tecnologías que optimizan el trabajo y estandarizan dichos procesos con el objetivo de ofrecer más eficiencia con la misma calidad. Esta tecnología trabaja con el control y la automatización de procesos, formando un sistema capaz de realizar los trabajos requeridos. Los transmisores permiten la lectura de las variables necesarias con el fin de estandarizar, controlar, evitar pérdidas o mejorar la producción. Estas medidas se han realizado de manera manual y requieren un gran número de trabajadores para controlar toda una fábrica. En la actualidad se ha empezado a implementar la tecnología digital la cual permite supervisar, controlar y actualizar los procesos mediante el uso de transmisores inteligentes. En este trabajo se hace un análisis de compatibilidad tecnológica entre dispositivos HART, el cual involucran modulaciones digitales y la industria utiliza la modulación por desplazamiento de frecuencia *FSK*.

El documento se estructura de la siguiente manera:

- En el capítulo 1 se establece el problema que se presenta en el laboratorio. En primer lugar, se describe el problema, se presentan los objetivos generales y específicos, se detalla la justificación e importancia del proyecto y finalmente se expresa las fases para realizar el proyecto.
- El capítulo 2 es el encargado de dar las bases teóricas para comprender el proyecto realizado en el campo de instrumentación y comunicación industrial.
- El capítulo 3 se presentan las pruebas realizadas en el laboratorio de instrumentación electrónica, usando los calibradores maestros secundarios de alta y baja gama como son

el DDCON100 y el comunicador de campo Rosemont 475 con los dispositivos HART existentes en el laboratorio.

- Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del proyecto desarrollado y recomendaciones que pudieran ser tomadas para proyectos futuros.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Definición del problema

El uso de las comunicaciones digitales en la industria hace posible el enlace de sensores, actuadores y controladores en las plantas dentro del proceso de manufacturación integrada mediante computador-CIM (Computer Integrated Manufacturing), en donde se tiene la posibilidad de intercambiar información entre el nivel SCADA y los elementos ubicados en el campo visualizados por medio de pantallas como un panel virtual que muestra las alarmas, ajustes o variables importantes en el proceso que se esté desarrollando.

El laboratorio de instrumentación industrial de la facultad de eléctrica y electrónica cuenta con diferentes módulos entre los cuales se encuentra el de presión, flujo y nivel y son conformados por dispositivos HART de diferentes fabricantes y diferentes versiones. Se propone analizar la compatibilidad entre los dispositivos HART y los instrumentos calibradores secundarios de gama baja y gama alta.

El dispositivo HART DDCON100 con el que cuenta la facultad se encuentra inhabilitado y permite comunicar el computador con la línea de comunicación del transmisor. La facultad cuenta con el comunicador de campo 475 que aún no está al servicio de los estudiantes y su habilitación a la comunidad académica complementaría el estudio del protocolo HART proyectándolo a un nivel industrial.

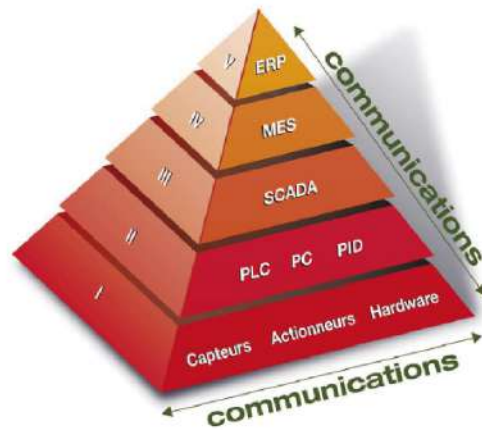


Figura 1: Computer Integrated Manufacturing. Imagen tomada de ¹

1.2. Objetivos

Para cumplir con el trabajo planteado se proponen los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivo general

Analizar la compatibilidad tecnológica entre los calibradores maestros secundarios Rosemount 475 y DDCON100 con equipos HART de diferentes fabricantes.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Resolver el problema de comunicación entre el maestro secundario HART DDCON100 y los transmisores SMAR LD301 y LD291 en el módulo de presión del laboratorio de instrumentación.

¹<https://images.app.goo.gl/7UP2WW718KNFdzNV9>

2. Identificar la compatibilidad entre los diferentes dispositivos HART que se encuentran en el laboratorio de instrumentación industrial.
3. Desarrollar una guía para el uso del comunicador de campo 475 para dispositivos HART.

1.3. Justificación e importancia

El proyecto plantea el análisis de la compatibilidad para la comunicación entre maestros secundarios y dispositivos HART como los transmisores E&H, transmisores SMAR para realizar cambios en los parámetros, lo cual optimizará los procesos pasándolo de medir el estado de la variable con el estándar 4-20 mA a tener la posibilidad de realizar cambios en los parámetros del transmisor tales como: unidades, spam y nivel de referencia cero, mediante el uso del protocolo HART.

Desarrollo que beneficiará a los estudiantes de pregrado puesto que brindará prácticas para profundizar el estudio del control de un sistema bajo el protocolo de comunicación HART. Se extiende el beneficio a los cursos de postgrado dado que se complementa la aplicación de redes de comunicación de uso industrial al observarse en un anillo de flujo el control mediante el estándar 4-20 mA y el control del mismo mediante el protocolo HART.

Con la realización del proyecto la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica de la UPB tendrá a su disposición un sistema que permitirá al estudiante familiarizarse con el protocolo de comunicación HART en el primer anillo del banco de flujo, desarrollándolo como un laboratorio para el estudio de las comunicaciones industriales y proyección de estos desarrollos hacia la industria.

Dado que la facultad de ingeniería se cuenta con un comunicador de campo de uso en la industria para realizar control y parametrización de dispositivos que se encuentran fuera de la red de comunicación, se buscará impactar en la academia al entregar una guía del comunicador de campo 475 de tal manera que al seguirla paso a paso dará al estudiante una primera

experiencia de operar un dispositivo de comunicación, control y parametrización industrial.

1.4. Procedimiento

En la primera fase del proyecto se habilitó el módulo de presión que actualmente solo se ejecuta la práctica mediante la utilización de una válvula manual y se analizó mirando el cambio de valor de la presión en los diferentes manómetros. En la segunda fase consistió en realizar pruebas de compatibilidad entre los diferentes dispositivos HART que se encuentran en el laboratorio con el calibrador secundario de gama baja (DDCON100) y el calibrador secundario de gama alta (475). En la tercera fase se realizó un análisis de los resultados obtenidos y se plantearon soluciones a los problemas que se presenten. Finalmente se desarrolló una guía del uso del comunicador de campo 475 de tal manera que los estudiantes de pregrado y posgrado amplíen la experiencia y el conocimiento de una herramienta usada en la industria.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las bases pertinentes para la comprensión del trabajo realizado.

2.1. Historia del protocolo HART

El protocolo de comunicación HART. Fue desarrollado por Rosemount Inc. a mediados de 1980 como propietario digital para sus instrumentos de campo inteligentes. Este se basó en el estándar de comunicación telefónica Bell 202. Pronto adquirió su nombre definitivo: HART y en 1986 pasó a ser un protocolo abierto.

En el año 1993 se estableció THE HART COMMUNICATION FOUNDATION, con sede principal en los Estados Unidos. Esta es una fundación independiente, la cual se encarga de brindar soporte mundial a desarrollos HART, así como también de establecer las especificaciones del protocolo y las normas que lo rigen.(Pallás, 2003)

2.2. Definición

HART es un protocolo de comunicación pensado para la medición y control de procesos industriales. Es eficaz para obtener información adicional como diagnósticos de los dispositivos digitalmente, mientras se mantiene la arquitectura de automatización de 4-20 mA.

Es un protocolo híbrido, llamado así porque es una mezcla de comunicación analógica y digital. Puede transmitir una sola variable principal usando una señal analógica de 4-20 mA,

y a su vez comunica información adicional sobre una señal digital. La información digital es superpuesta por una modulación FSK.(SOLÉ, 2012)

2.3. Características

2.3.1. Comunicación bidireccional

Al usar una señal analógica la información se envía en una sola dirección, ya sea del elemento final de control al controlador o viceversa. Con la tecnología digital se logra transportar en ambas direcciones usando la señal de comunicación HART. Esto abre la posibilidad de recibir la señal de control desde un dispositivo controlador y enviar información de importancia como el estado actual del proceso y ajustes de configuración(Hart Communication Foundation, 2017).

2.3.2. Nuevos tipos de información

Los dispositivos analógicos comunican solo una variable de proceso y generalmente no se tiene una manera fácil de conocer la veracidad de la información que están enviando.

Con el protocolo de comunicación HART se recibe la variable de proceso y a su vez otros tipos de información como por ejemplo: Estado actual del dispositivo, diagnósticos, las unidades, rango de operación, fabricante, nombre del dispositivo y demás parámetros básicos de configuración.

Con esta información adicional los dispositivos compatibles con HART pueden decir si están configurados correctamente y operando como se espera. Esto ayuda disminuyendo las revisiones de rutinarias y a su vez detecta fallas con anterioridad a un mayor problema durante el proceso que se esta trabajando(Pallás, 2003).

2.3.3. Amplio suministro

Debido al alto impacto del protocolo HART, este se ha convertido en uno de los protocolos con mas soporte a nivel mundial, con casi 600 elementos compatibles de diferentes proveedores.

La variedad de elementos compatibles significa una alta probabilidad de que se encuentre un producto HART en casi cualquier aplicación de proceso(Hart Communication Foundation, 2015a).

2.4. Especificaciones

2.4.1. Actualizaciones

El protocolo HART fue adoptado en 1993 por una organización llamada HART Communication foundation,la cual es sin animo de lucro y se encarga de realizar actualizaciones y revisiones del protocolo.

La mejora del protocolo HART inició en 1987 con la revisión número dos, seguidamente en 1988 y 1989 se realizaron las actualizaciones 3 y 4. A partir de ese momento las actualizaciones se realizan de manera compatible con las versiones anteriores. La versión actual del protocolo HART es la revisión 7(Hart Communication Foundation, 2015b).

2.4.2. Modelo OSI

El protocolo HART usa las arquitecturas jerárquica 1, 2, 3, 4 y 7 del *Open Systems Interconnection*.

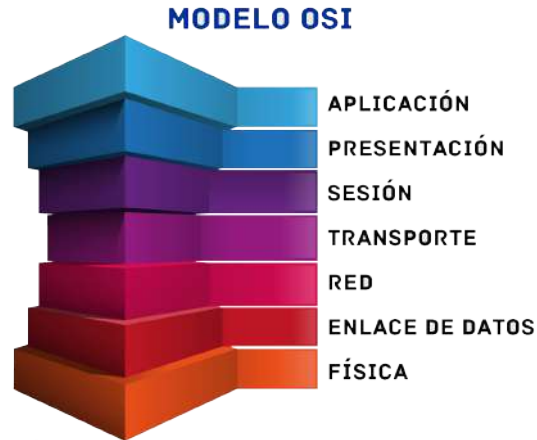


Figura 2: Modelo OSI. *Open Systems Interconnection*. Imagen tomada de ¹

Gracias a la capa 1, se logra superponer la señal digital sobre la señal analógica de 4-20mA sin que esta sea afectada. En la capa de enlaces de datos se determina la configuración maestro/esclavo y la capa 7 se determina la composición de los mensajes que realiza la comunicación(SOLÉ, 2012). A continuación se realiza una descripción de las capas:

- **El nivel físico** HART usa el estándar Bell 202, el cual es un estándar de comunicación telefónica que rige el principio de modulación FSK. La señal digital se compone por una señal sinusoidal con una frecuencia de 1200 Hz que representa un "1" lógico y 2200 Hz representa un "0" lógico. Dado que el promedio de la señal FSK es 0, el valor de la señal analógica 4-20 mA se mantiene intacta(Hart Communication Foundation, 2015b).

- **El nivel enlace de datos**

El protocolo de comunicación HART determina una configuración maestro/esclavo, en el cual un dispositivo de campo responde ante una petición y también permite la configuración de dos maestros, por ejemplo, un sistema de control como maestro primario y un comunicador de campo portátil HART como maestro secundario(SOLÉ, 2012).

¹<https://images.app.goo.gl/WUrETU1vwYwwLkkp9>

■ El nivel de aplicación

La estructura del mensaje del protocolo HART está elaborada típicamente por 20 o 30 bytes.

El mensaje HART tiene un formato observado en la figura 3. El *preámbulo* permite que el receptor se sincronice con la frecuencia de la señal. El *inicio* puede tener diferentes valores posibles, indicando que si el mensaje es o no tipo ráfaga. El campo de dirección contiene como su nombre lo indica, la dirección del maestro como a del esclavo. El comando tiene 0 al hexadecimal FD o decimal 253, y representa la acción que se quiere realizar con los dispositivos HART. El estado consta de dos bytes encargados de reportar cual error en la comunicación. Los datos pueden estar en forma de enteros sin signos número de punto flotantes codificados o cadenas de caracteres ASCII(Hart Communication Foundation, 2015a).



Figura 3: Mensaje HART. Fuente: Autor

2.5. Funcionamiento

2.5.1. Modulación por desplazamiento de frecuencia

El protocolo HART está basado en la norma de comunicación Bell 202 que rige la modulación FSK para superponer señales digitales sobre señales analógicas de 4-20 mA. La frecuencia 2200 Hz representa un 0 lógico y la frecuencia 1200 Hz un 1 lógico(Hart Communication Foundation, 2015b).

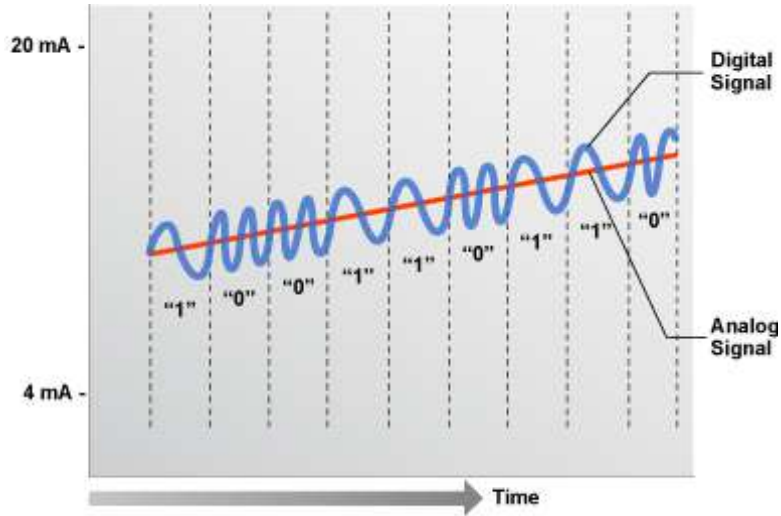


Figura 4: Modulación por desplazamiento de frecuencia. Imagen tomada de ²

Gracias a esto se logra realizar una comunicación bidireccional y es posible transmitir información extra de un instrumento inteligente de campo y hacia el mismo. El protocolo HART logra comunicarse con una velocidad de 1200 bps sin interrumpir el estándar analógico 4-20 mA y permite obtener dos o más actualizaciones digitales por segundos de un dispositivo.

La Modulación FSK es una alternativa de transmisión digital que utiliza dos frecuencias diferentes. La señal moduladora puede variar solo en dos valores de tensión representando un tren de pulsos (Pallás, 2003).

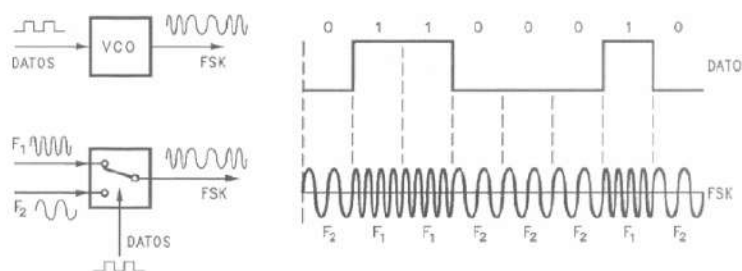


Figura 5: Método de modulación. Imagen tomada de ³

²<https://images.app.goo.gl/2Cr6dCBFNTnvEoav7>

³<https://images.app.goo.gl/kLThiuoWYQDqgB369>

2.5.2. Modos de comunicación

El protocolo HART usa la configuración maestro/esclavo, el cual consiste en que un elemento inteligente de campo se comunica con el maestro que le habla. La tecnología HART usa os modos punto a punto o multipunto para transmitir información.

Para realizar la comunicación HART se necesitan dos o más dispositivos compatibles con la tecnología. Generalmente un elemento inteligente de campo y un sistema de control.

El protocolo HART usa dos canales para realizar la comunicación: señal analógica de 4-20 mA y señal digital.

La señal de 4 a 20 mA comunica el valor primario medido con el circuito de corriente 4 a 20 mA. La información referente al dispositivo se transmite mediante una señal digital modulando a la señal analógica(Hart Communication Foundation, 2015a)

El protocolo HART permite usar hasta dos dispositivos configurados como maestros "*Primario y secundario*". Con esta configuración se logra usar maestros secundarios como el comunicador de campo 475 de Rosemont sin interferir con los demás dispositivos encontrados en el sistema.

Comunicación punto a punto

En la configuración punto a punto, la señal analógica 4-20 mA transporta la información de la variable principal del proceso. Por otro lado la información extra como los parámetros de configuración del dispositivos se realizan de manera digital usando el protocolo HART(Hart Communication Foundation, 2017).

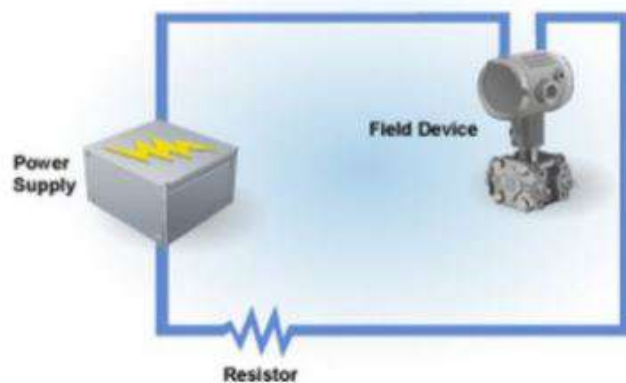


Figura 6: Configuración Punto a Punto. Imagen tomada de⁴

Comunicación multipunto

La configuración multipunto necesita un par de hilos y fuentes de alimentación de 24 voltios para conectar hasta 16 dispositivos de campo. Toda la información se transmite de manera digital (Corporación CDT de gas, 2010).

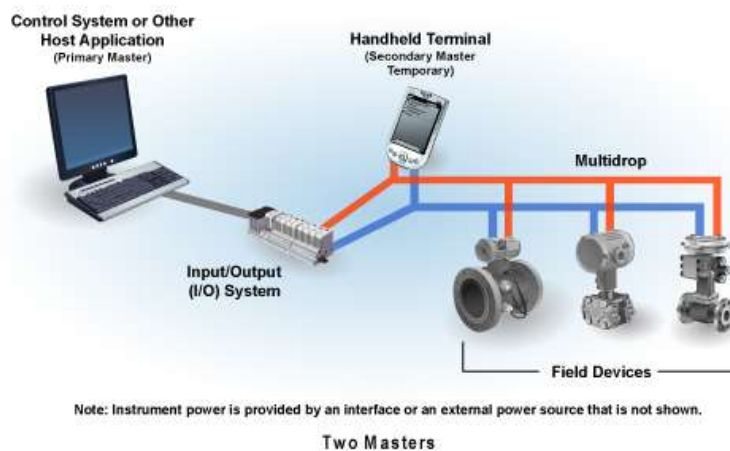


Figura 7: Configuración Multipunto. Imagen tomada de⁵

⁴<https://images.app.goo.gl/8w7r7Hi7MKZmhaiv6>

⁵<https://images.app.goo.gl/aDkaycDbMBs32Dwm6>

2.6. Comandos protocolo HART

Para realizar funciones preestablecidas, el protocolo utiliza comando que se pueden categorizar en tres grupos(Pallás, 2003):

2.6.1. Comandos Universales

Estos comandos son funciones que tienen todos los dispositivos de campo tienen en común, por ejemplo: fabricante, modelo, fecha, estado del dispositivo, etc. Los comandos universales se encuentran entre 0 y 30. La tabla 1 contiene un resumen de estas funciones.

Tabla 1: Comandos universales del protocolo HART

Comandos	Función
0, 11	Identificar el dispositivos (Fabricante, tipo de dispositivo, etiqueta de revisión)
1, 2, 3	Leer variables medidas
6	Establecer dirección de escaneo.
12, 13, 17, 18	Leer y escribir información introducida por el usuario (Tag, fecha, mensaje).
14, 15	Leer información del dispositivo (Número serial del sensor, límites del sensor, operación de alarma, valores del rango).
16, 19	Leer y escribir número final de ensamble.

2.6.2. Comandos de práctica común

Estos comandos son encontrados dentro del rango 32 hasta 126 y son funciones comunes a muchos dispositivos de campo. Cuando estas funciones se implementan en un dispositivo, estos comandos deben ser utilizados para invocarlas. Ejemplo: lectura de

variables del dispositivo, calibración *zero* y *span*, cambio de unidades de ingeniería, etc.

En la tabla 2 se observa un resumen de dichos comandos(Pallás, 2003).

Tabla 2: Comandos de práctica común del protocolo HART

Comandos	Función
33, 61, 110	Leer variables medidas
34, 37, 44, 47	Establecer parámetros de operación (Rango, unidades, función de transferencia).
38	Reiniciar la bandera de Configuración modificada”.
39	Control de la EEPROM.
40-42	Funciones de diagnóstico (modo de corriente fija, auto prueba, reset).
43,45,46	Ajuste de la entrada y salida analógica.
48	Leer estados adicionales.
49	Escribir el número serial del sensor.
50-56	Uso de variable del transmisor.
57-58	Información de la unidad (Tag, descripción, fecha).
59	Escribir el número de bytes de preámbulo necesarios.
60, 62-70	Uso de múltiples salidas analógicas.
107-109	Control de modo ráfaga.

2.6.3. Comandos específicos

Estos comandos son encontrados dentro del rango 128 hasta 253. Son funciones únicas del dispositivo. En revisiones anteriores a la cuarta, los comandos incluían el código del tipo de dispositivo como el primer byte del campo para que este comando no llegara a un dispositivo diferente. Esto fue abandonado en la revisión 5, cuando se incluyó el

número identificador único, que cumple con la misma función(Pallás, 2003).
Ejemplo: opciones de calibración, conversión de unidades de ingeniería, etc.

2.7. ventajas del protocolo HART

Entre las ventajas del protocolo HART se encuentran:

- Permite 256 variables.
- Los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus hasta con 16 Dispositivos.
- Es una alternativa eficaz y económica de comunicación digital.

2.8. Configuración de dispositivos

La tecnología HART permite varias maneras de llegar a la información en un dispositivo.

Es posible acceder a todos los datos HART de un dispositivo compatible con HART desde cualquier lugar de la señal de 4-20 mA. La conexión no tiene que ser en las terminales en el dispositivo. Esta característica reduce el número de viajes a campo ya que el acceso se puede hacer en el panel.

Las razones para comunicarse con los dispositivos es son la configuración y diagnóstico del mismo. Una vez que el dispositivo está configurado, el dispositivo mantiene la configuración que permite la instalación en la aplicación de proceso.

Un dispositivo compatible con HART se puede configurar mediante las herramientas de hardware y software proporcionadas por las empresas asociadas a la Fundación de Comunicación HART(SOLÉ, 2012).

Para configurar un dispositivo se necesita una herramienta universal de configuración de mano, una fuente de alimentación, un resistor de carga y un dispositivo compatible con HART. La configuración también se puede lograr usando un PC con una aplicación de configuración del dispositivo y utilizar un módem HART.

2.8.1. Comunicadores universales portátiles

Los comunicadores HART portátiles están disponibles con proveedores de instrumentación industrial en todo el mundo y son apoyados por las empresas asociadas a la Fundación HART. Las ventajas de utilizar un comunicador de mano, son la portabilidad y, potencialmente, la capacidad de operar en entornos adversos(SOLÉ, 2012).



Figura 8: Comunicador portátil HART. Imagen tomada de ⁶

⁶<https://images.app.goo.gl/hCq51vPRpLttfd2Z8>

2.8.2. Configuración de dispositivos basadas en PC

Es posible configurar un dispositivo compatible con HART con una PC. Para ello, se utiliza una aplicación de software basada en PC y un módem de interfaz HART. En comparación con un comunicador portátil, un PC puede ofrecer una pantalla mejorada (SOLÉ, 2012).

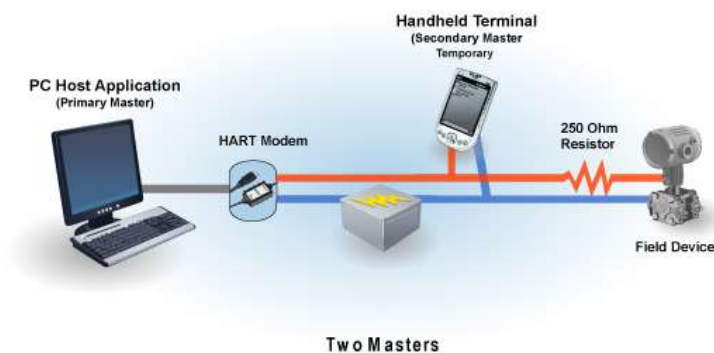


Figura 9: Conexión de un PC a un dispositivo HART. Imagen tomada de⁷

2.9. Descripción del laboratorio

El laboratorio de instrumentación electrónica de la universidad pontificia bolivariana seccional bucaramanga, se encuentra ubicada en el edificio K en el salón 302. Cuenta con módulos para el entrenamiento en la medición de variables tales como: Nivel flujo, nivel, temperatura y presión.

⁷<https://images.app.goo.gl/JgMqBztP2HRHkdvn9>



Figura 10: Entrada laboratorio instrumentación electrónica. Fuente Autor.

Dentro de sus características se encuentran:

2.9.1. Espacio físico

El laboratorio de instrumentación electrónica de la universidad pontificia bolivariana tiene 86 metros cuadrados apropiadamente distribuidos para los diferentes módulos. Cada módulo del laboratorio cuenta con diferentes herramientas para la medición de las variables. De igual manera, el laboratorio dispone servicios de agua, conexión a la red eléctrica, suministro de aire comprimido, suministro de energía auxiliar y servicio de internet. Este laboratorio se encuentra administrado por el departamento administrativo de laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el cual es el encargado de velar por la logística del mismo.

2.9.2. Condiciones del lugar

El laboratorio de instrumentación electrónica cuenta con lectura de temperatura y humedad relativa, esto para tener un ambiente apropiado para el trabajo y control de las variables. Para esto, se hace uso de un sensor de temperatura, humedad relativa y reloj digital con sensor de temperatura integrado. A su vez, se cuenta con un sistema de aire acondicionado integral que mantiene la temperatura constante en toda el área del laboratorio.

2.9.3. Servicios industriales

Los módulos cuenta con varios servicios industriales como:

Servicio de Agua

Se cuenta con el servicio de agua y este es suministrado mediante un grifo de 1/2 pulgada. El servicio es proporcionado por el acueducto que le suministra agua al edificio K de la universidad Pontificia Bolivariana.



Figura 11: Servicio de Agua. Fuente Autor.

Servicio de energía

Para conectarse a la red eléctrica, se cuenta con 2 toma-corrientes de 110 V y 220 V, los cuales suministran la energía suficiente para el funcionamiento del modulo de flujo.



Figura 12: Servicio de energía. Fuente Autor.

Servicio de internet

El laboratorio cuenta con una conexión a internet LAN que soporta velocidades hasta de 20 Mbps.



Figura 13: Servicio de internet. Fuente Autor.

Suministro de energía auxiliar

En el módulo se tiene un sistema auxiliar de energía que permite el continuo flujo de corriente en caso de fallos del suministro de energía principal. El sistema está constituido por una planta Diésel y un banco de baterías.



Figura 14: Suministro de energía auxiliar. Fuente Autor.

Servicio de aire acondicionado central

Para mantener un ambiente controlado en temperatura y humedad se tiene un sistema de ventilación compuesto por un aire acondicionado industrial con el cual se controla la temperatura y humedad del laboratorio.



Figura 15: Servicio de aire acondicionado central. Fuente Autor.

Sistema de iluminación

El laboratorio cuenta con 9 módulos de lámparas fluorescentes para poder iluminar adecuadamente cada área de trabajo.



Figura 16: Sistema de iluminación. Fuente Autor.

Servicios auxiliares

El laboratorio cuenta con una zona de mantenimiento para los instrumentos, la cual es compartida con los demás módulos. Adicionalmente en materia de seguridad se cuenta con un extintor de incendios, una alarma y un sensor de movimiento el cual se pone en funcionamiento en horas no laborales para la detección de algún tipo de anomalía.

2.10. Módulos del laboratorio

2.10.1. Módulo de presión

Este módulo se compone por manómetros, bomba manual FLUKE, válvulas reguladoras y dos transmisores de presión marca SMAR. Consiste en analizar la medición de presión en un proceso que involucra instrumentos analógicos e instrumentos electrónicos (transmisores SMAR LD301-LD291) y su comunicación por medio del protocolo

HART.



Figura 17: Módulo de presión. Fuente Autor.

Transmisor SMAR LD301

Es un transmisor de presión inteligente para la medición diferencial, manométrica y absoluta de diámetro, nivel y flujo. Se basa en un sensor capacitivo probado en el campo, que ofrece un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. La tecnología digital que se usa en el LD301 permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control, y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.



Figura 18: Transmisor SMAR LD301. Imagen tomada de⁸

Transmisor SMAR LD291

El LD291 es un transmisor de presión inteligente para la medición de presión manométrica y nivel. El transmisor se basa en un sensor capacitivo probado en el campo, que ofrece un funcionamiento seguro y alto rendimiento. La tecnología digital que se usa en el LD291 permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control, y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.

⁸<https://bit.ly/2lY9not>



Figura 19: Transmisor SMAR 291. Imagen tomada de ⁹

2.10.2. Módulo del banco de flujo

El banco de flujo es un módulo que se conforma por una bomba de agua que es controlada por un variador de velocidad, un sensor de flujo electromagnético Endress & Hauser, un manómetro y el tanque de almacenamiento. Se realizan prácticas para estudiantes de pregrado, especialización y postgrado. Su objetivo es analizar las especificaciones técnicas, poner en operación un sistema tipo industrial y evaluar las características del proceso y de los instrumentos analógicos y digitales.

⁹<https://bit.ly/2kypc4V>



Figura 20: Módulo del banco de flujo. Fuente Autor.

Caudalimetro Promag 50 Endress & Hauser

El transmisor E&H es un dispositivo que permite su configuración para ejecutar trabajos en la industria. Trabaja con el estándar 4-20mA para medir el volumen de caudal. Adicionalmente su señal de salida está diseñada para comunicarse mediante el protocolo HART lo cual permite cambiar sus parámetros desde una estación remota.



Figura 21: Caudalimetro Promag 50 Endress & Hauser. Imagen tomada de ¹⁰

¹⁰<https://bit.ly/2kz2Ccz>

2.10.3. Módulo de nivel

El módulo de nivel es un proceso que involucra un sensor capacitivo (Liquicap-M-FM151), un sensor de radar convencional (Micropilot-FMR51), un sensor de radar de onda guiada (Levelflex-FMP52), un sensor de presión diferencial (Deltapilot-M fmb50), un calibrador universal HART y una bomba de agua. Este proceso es involucra la comunicación por medio del protocolo HART de forma multipunto permitiendo adquirir los datos desde una única línea de comunicación como lo muestra la figura



Figura 22: Módulo de nivel. Fuente Autor.

Transmisor Endress & Hauser Deltapilot M FMB50

Sensor de presión compacto con célula de medición Contite para la medición de nivel por columna hidrostática. El transmisor compacto Deltapilot con célula de medición Consiste resistente a la condensación se usa típicamente en aplicaciones de proceso e higiénicas. Está pensada para la medición de nivel en aplicaciones con productos líquidos y pastosos en contenedores abiertos o cerrados, y es insensible a la posible

formación de espuma. Actualmente está situado en el módulo de nivel del laboratorio de instrumentación industrial de la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica.



Figura 23: Transmisor Endress & Hauser Deltapilot M FMB50. Imagen tomada de ¹¹

Transmisor Endress & Hauser Micropilot FMR51

El Micropilot M es un transmisor de nivel por radar, compacto, para la medición de líquidos, pastas, lodos y sólidos, de una forma continua y con ausencia de contacto material. El equipo puede montarse asimismo sin restricciones en el lado exterior de recipientes metálicos cerrados gracias a su frecuencia de operación de aproximadamente 26 GHz y a una energía pulsada irradiada máxima de 1 mW (potencia media de salida 1 W). Su funcionamiento es totalmente inocuo para seres humanos y animales.

¹¹<https://bit.ly/2lI9XGI>



Figura 24: Transmisor Endress & Hauser Micropilot FMR51. Imagen tomada de ¹²

Transmisor Endress & Hauser Levelflex FMP52

El transmisor Levelflex se usa en medición de nivel incluso bajo condiciones de proceso extremas como alta temperatura y alta presión en la industria de proceso. Levelflex se usa para la medición de nivel de líquidos, pastas y lodos, pero también para la medición de la interface. La medición no se ve afectada por condiciones cambiantes del producto, los cambios de temperatura, ni la presencia de gases o vapores.

¹²<https://bit.ly/2lBugFY>



Figura 25: Transmisor Endress & Hauser Levelflex FMP52. Imagen tomada de ¹³

Transmisor Endress & Hauser Liquicap M FM151

Para medición en continuo de nivel e interface en líquidos Liquicap es una sonda de varilla fiable completamente aislada para la monitorización de nivel en continuo en aplicaciones con líquidos, en particular con productos con tendencia a formar adherencias y temperaturas muy elevadas. La medición es independiente de la constante dieléctrica (cd).

¹³<https://bit.ly/2lIqgDt>



Figura 26: Transmisor Endress & Hauser Liquicap M FM151. Imagen tomada de ¹⁴

¹⁴<https://bit.ly/2lzZtcL>

CAPÍTULO 3

PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD

3.1. Prueba 1. Módulo de presión utilizando el calibrador secundario de gama alta

Se realizó un seguimiento de las conexiones del tablero de control del módulo de presión para determinar el estado de las mismas. No se encontraron problemas y se procedió a realizar pruebas entre los transmisores SMAR LD301 y LD291 con el comunicador de campo 475.

El diseño del tablero de control del módulo de presión tiene separadas las líneas de comunicación HART para cada transmisor como se muestra en la figura 27



Figura 27: Arreglo de resistencias para la salida del protocolo HART para los transmisores LD301 y LD291. Fuente autor.

Se realizaron las conexiones para el transmisor LD301 y se realizó el barrido en el comunicador de campo 475 para reconocer el transmisor como se muestra en la figura 29.



Figura 28: Inicio del comunicador de campo Rosemount 475. Fuente autor



Figura 29: Reconocimiento del transmisor LD301 en el comunicador de campo Rosemount 475. Fuente autor.

Como se muestra en la Figura 30 el transmisor LD301 permite comunicarse en dos formas, se debe seleccionar la primera opción porque como se mencionó anteriormente el diseño del módulo de presión se hizo con las líneas de comunicación HART separadas y no por multipunto.

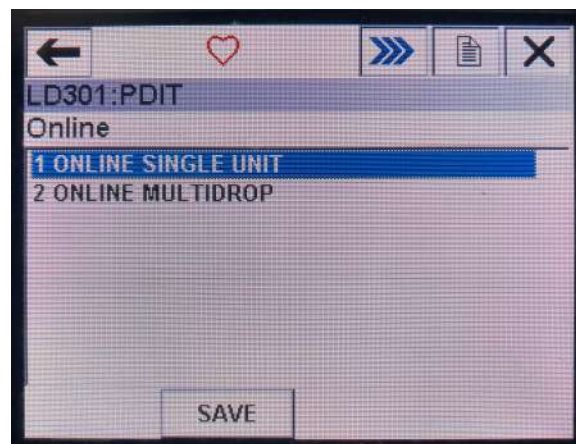


Figura 30: Tipo de comunicación por medio del protocolo HART. Fuente autor.

La figura 31 muestra las opciones que podemos escoger para el transmisor LD301, cada una tiene diferentes parámetros que pueden ser modificados y se evidencia en el display del transmisor.

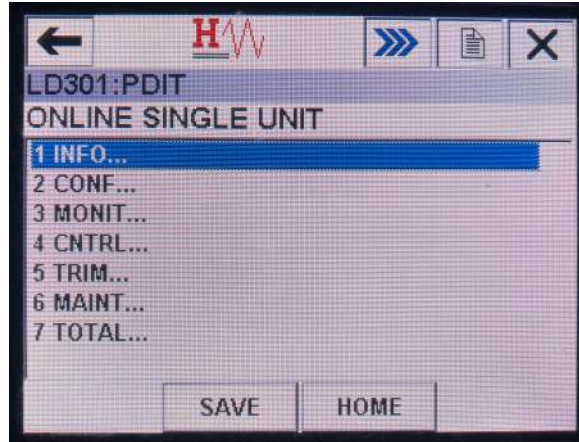


Figura 31: Menú del transmisor LD301. Fuente autor.

Se realizó una prueba cambiando la unidad de medida de la variable (presión) teniendo un estado inicial. Estos cambios se realizan en el menú RANGE como se muestra en las figuras 32 y 33.



Figura 32: Display del transmisor LD301. Fuente autor.

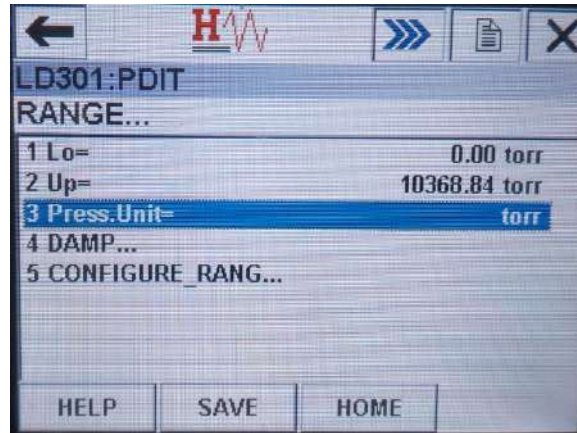


Figura 33: Menú del rango y las unidad de medida del transmisor LD301. Fuente autor.

Se pueden modificar las variables que se deseen mostrar en el display, una de las características particulares de los transmisores SMAR es que permite informar el estado de dos variables al tiempo y configurar el tiempo que se mantiene la variable en el display. En la figura 34 se muestra el estado actual del transmisor presentando la primera y segunda variable.

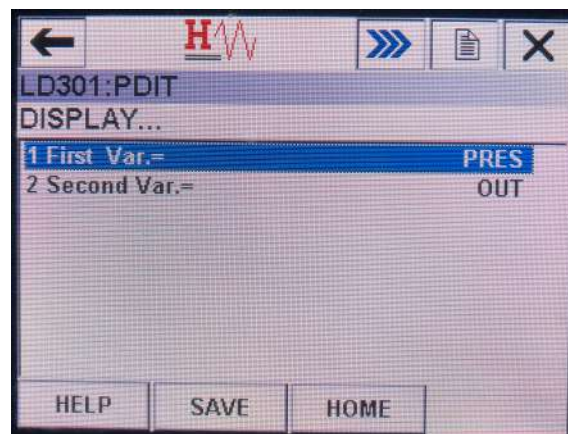


Figura 34: Menú del display del transmisor LD301. Fuente autor.

Se ingresa a cualquiera de las dos opciones y se puede seleccionar la variable que se quiere mostrar en el display del transmisor LD301 como se muestra en la figura 35.

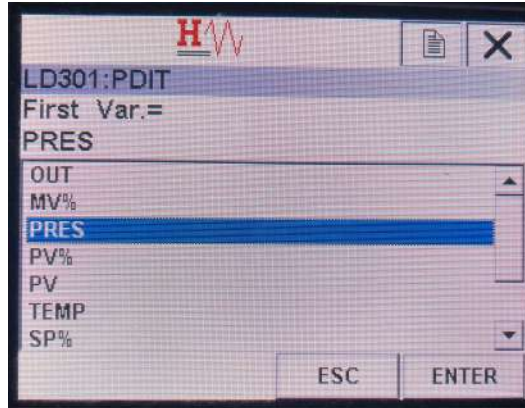


Figura 35: Menú de variables que se muestran en el display del transmisor LD301. Fuente autor.

La figura 36 muestra el cambio de las variables en el transmisor LD301 y la figura 37 muestra el display del transmisor para evidenciar el correcto funcionamiento entre el comunicador de campo 475 y el transmisor.

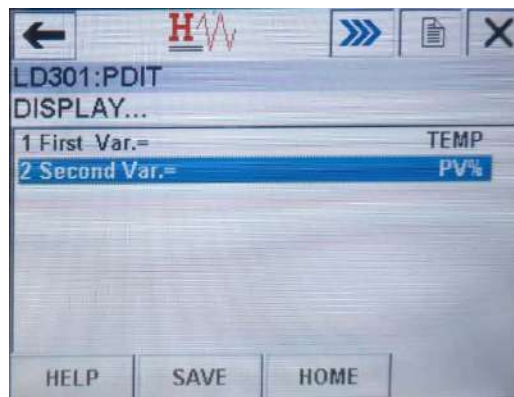


Figura 36: Menú de variables que se muestran en el display del transmisor LD301. Fuente autor.



Figura 37: Display del transmisor LD301. Fuente autor.

Se realizaron pruebas con el transmisor LD291 utilizando el calibrador secundario de gama alta, se realizó el barrido para encontrar el transmisor en el comunicador de campo 475 como se presenta en la figura 38.

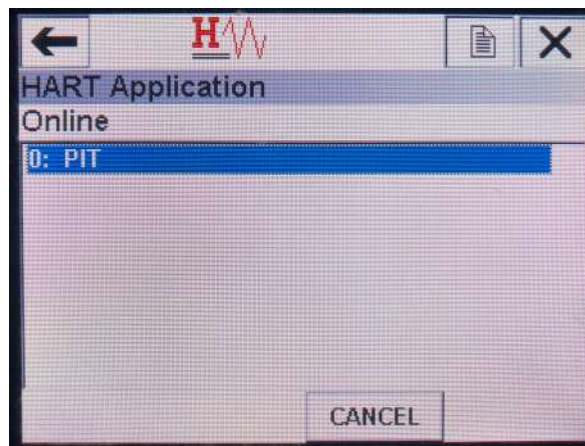


Figura 38: Reconocimiento del transmisor LD291 en el comunicador de campo Rosemount 475. Fuente autor.

El calibrador secundario de gama alta también permite realizar cambios en los parámetros del transmisor LD291 como se muestra en la figura 39 y se puede tener la lectura del estado actual del transmisor en la opción de monitor como se muestra en la figura 40.

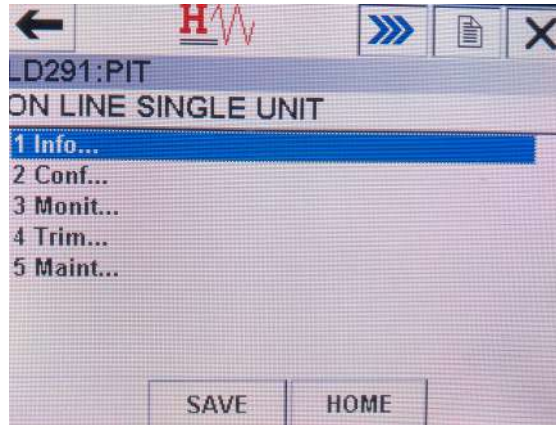


Figura 39: Menú del transmisor LD291. Fuente autor.

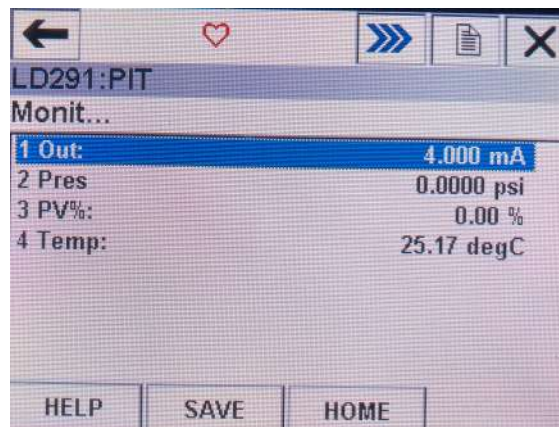


Figura 40: Menú del monitor del transmisor LD291. Fuente autor.

3.2. Prueba 2. Módulo de presión utilizando el calibrador secundario de gama baja

El calibrador de gama baja (DDCON100) se encontraba inhabilitado porque las versiones que permitían el correcto funcionamiento del software se trabajaban en un sistema operativo Windows XP. Se realizó la instalación del software y se instalaron los drivers para el controlador USB del DDCON100 en el computador para que permitiera el correcto funcionamiento y reconociera los transmisores sin fallas como se muestra en la figura 41 para el transmisor LD291.

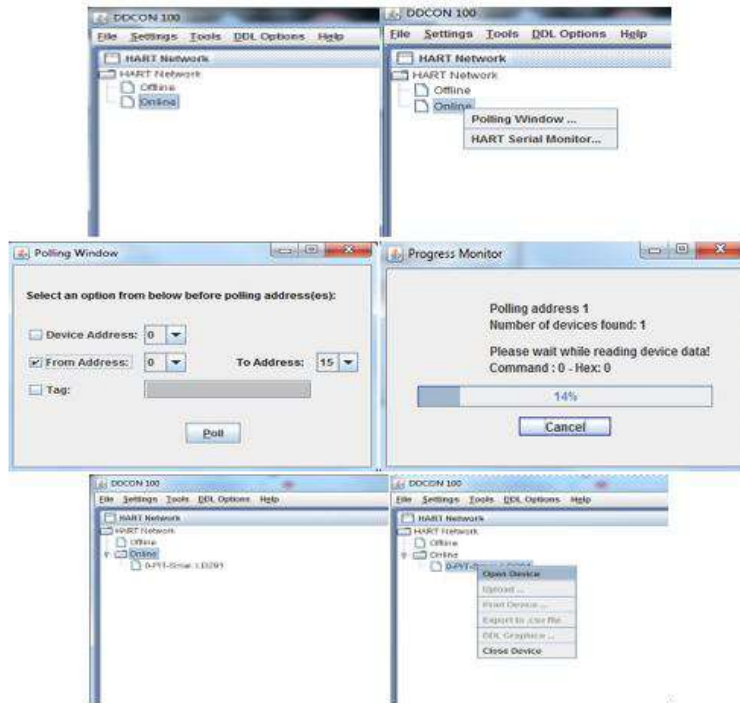


Figura 41: Reconocimiento del transmisor LD291 con el calibrador de gama baja. Fuente autor.

Como se ve en la figura 42 el software permite realizar diferentes cambios en los parámetros del transmisor, calibrar el transmisor, monitorear en tiempo real el estado de la variable y más aplicaciones. La figura 43 muestra la ventana de rango en donde se puede modificar la unidad de la variable (presión). La figura 44 muestra la venta TRIM que permite realizar cambios para calibrar el transmisor de acuerdo a la finalidad que se necesite.

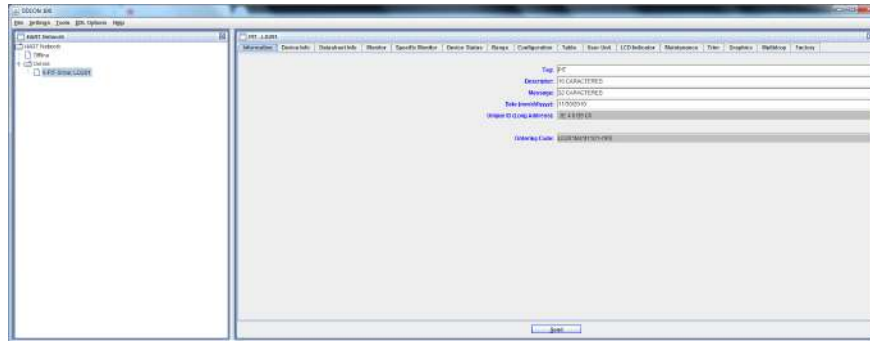


Figura 42: Interfaz del transmisor LD291. Fuente autor.

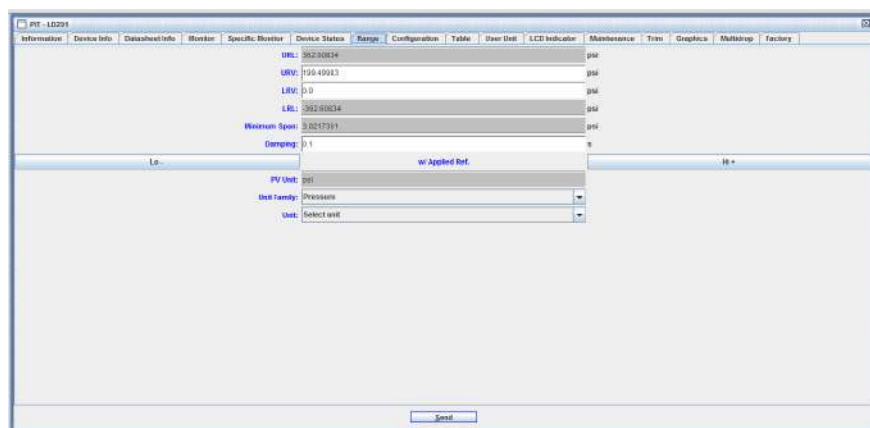


Figura 43: Interfaz de la ventana de rango del transmisor LD291. Fuente autor.

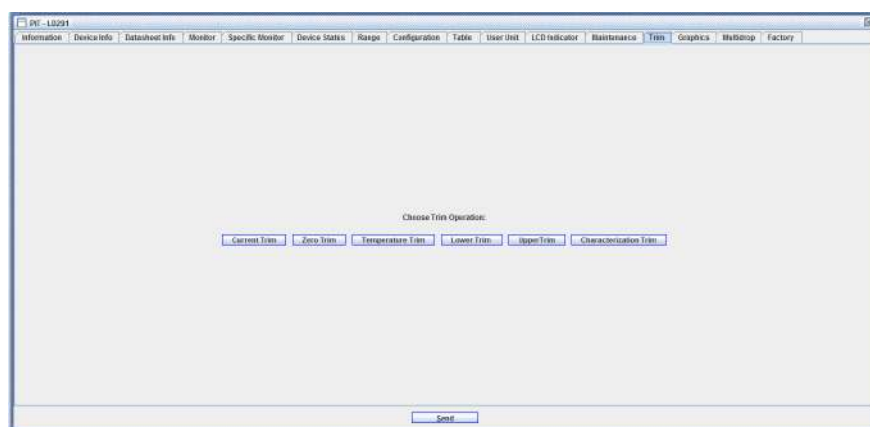


Figura 44: Interfaz de la ventana TRIM del transmisor LD291. Fuente autor.

Para el transmisor LD301 se realizaron los mismos procedimientos del transmisor

LD291 para lograr una correcta comunicación entre el calibrador secundario y el dispositivo HART. La figura 45 muestra el reconocimiento del transmisor LD301 con el PC.

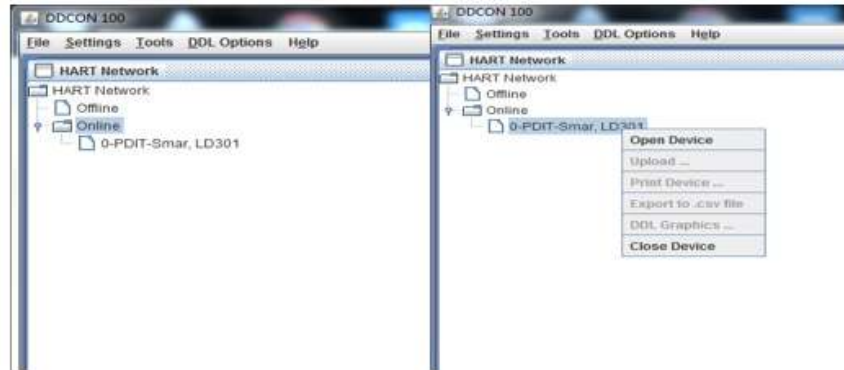


Figura 45: Reconocimiento del transmisor LD301 con el transmisor de gama baja. Fuente autor.

3.3. Prueba 3. Módulo del banco de flujo utilizando el calibrador secundario de gama alta

Se realizó un seguimiento de las conexiones del tablero de control del módulo del banco de flujo, la línea de comunicación HART no estaba habilitada, su cableado si llegaba al tablero de control a una tarjeta de adquisición de datos por el estándar 4-20mA. Se realizó un arreglo eléctrico como se muestra en la figura 46 para conectar el calibrador.

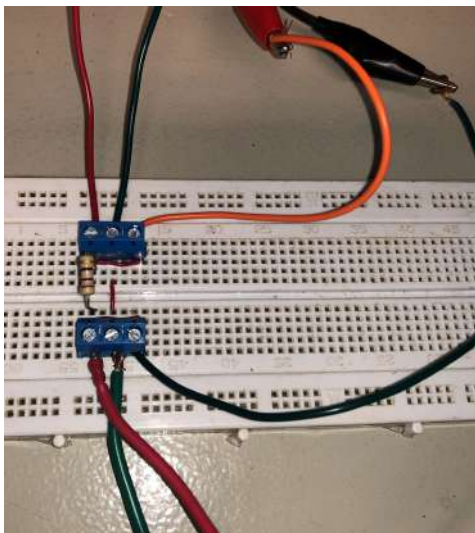


Figura 46: Arreglo de resistencias del modulo del banco de flujo. Fuente autor.

Se conectó el calibrador secundario de gama alta como se muestra en la figura 47.



Figura 47: Conexión del comunicador de campo Rosemount a la salida HART del transmisor Promag 50. Fuente autor.

Se realizó el barrido en el comunicador de campo, como se muestra en la figura 48 el comunicador de campo no reconoce el transmisor PROMAG 50.



Figura 48: Respuesta del barrido para reconocer el transmisor Promag 50. Fuente autor.

3.4. Prueba 4. Módulo del banco de flujo utilizando el calibrador secundario de gama baja

Para esta prueba se realizó la conexión del DDCON100 al arreglo eléctrico como se muestra en la figura 49 (LA DE LA PROTOBOARD), posteriormente se realizó desde el software el barrido para reconocer el transmisor PROMAG 50 como se muestra en la figura 49.

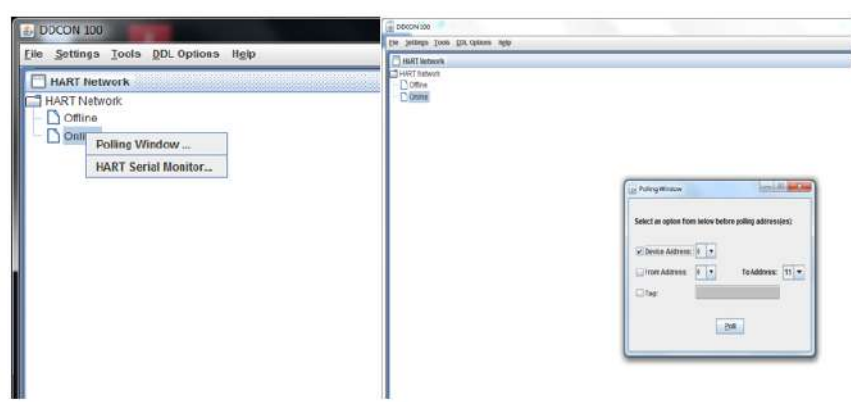


Figura 49: Barrido para comunicar el PC con el transmisor program 50. Fuente autor.

El software del DDCON100 no reconoce el transmisor PROMAG 50 porque este dispo-

sitivo no se encuentra en las versiones disponibles debido a que es una versión antigua, pero su sucesor si está disponible para este software (PROMAG 53) como se muestra en la figura 50.

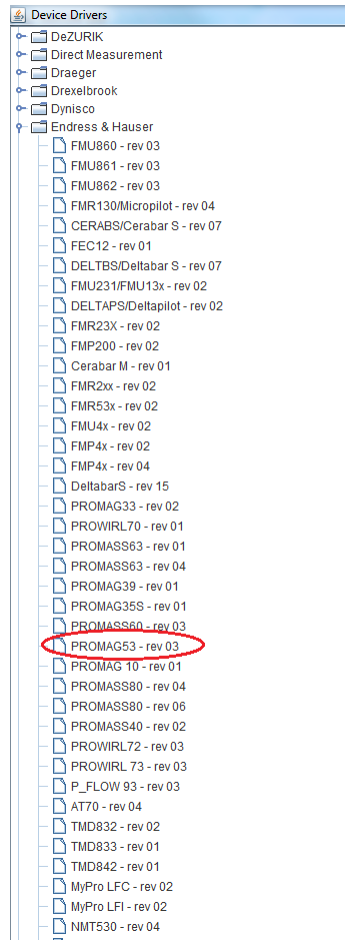


Figura 50: Listado de dispositivos compatibles de Endress&Hauser con el DDCON100.
Fuente autor.

3.5. Prueba 5. Módulo de nivel utilizando el calibrador secundario de gama alta

Se realizó una revisión de las conexiones del tablero de control del módulo nivel para la línea de comunicación HART tipo multipunto, su cableado se encontró en condiciones óptimas y se procedió a realizar las pruebas. Como se muestra la figura 51 la conexión

del calibrador secundario de gama alta es de fácil acceso, al ser una configuración multipunto se logra la comunicación con los cuatro transmisores (FMB50, FMR51, FMP52, FM151) desde una sola salida.



Figura 51: Salida multipunto del protocolo HART en el modulo de nivel. Fuente autor.

Se realizaron pruebas con el comunicador de campo 475 para los cuatro transmisores, como se muestra en la figura 52 se reconocen los transmisores con el comunicador de campo.

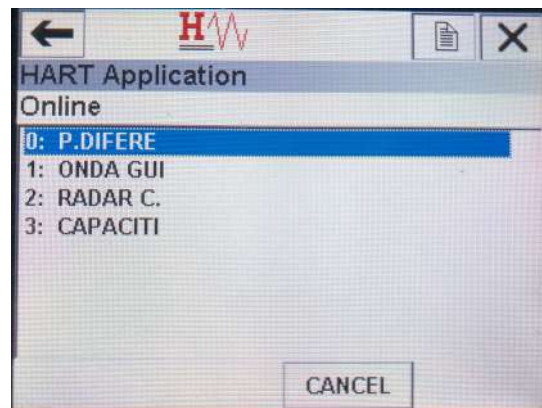


Figura 52: Reconocimiento de los cuatro transmisores del modulo de nivel. Fuente autor.

Se realizó calibración de cada transmisor y cambios de parámetros para realizar las pruebas de compatibilidad entre los dispositivos HART y el comunicador de campo 475. Las figuras 53 a 56 muestran las pruebas realizadas.

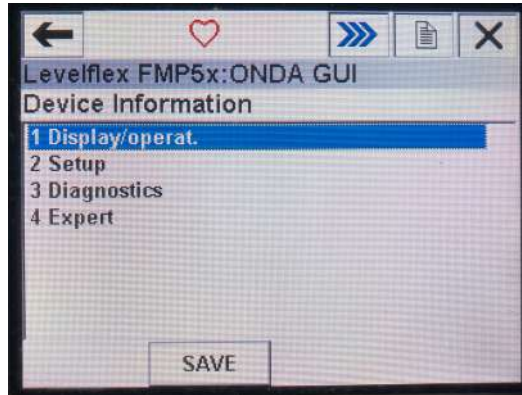


Figura 53: Menú del transmisor Levelflex FMP52. Fuente autor.

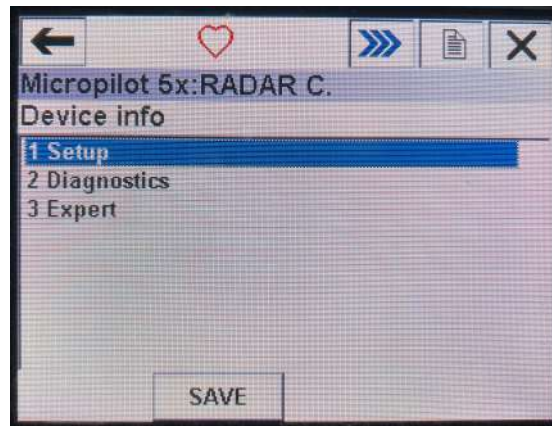


Figura 54: Menú del transmisor Micropilot FMR51. Fuente autor.

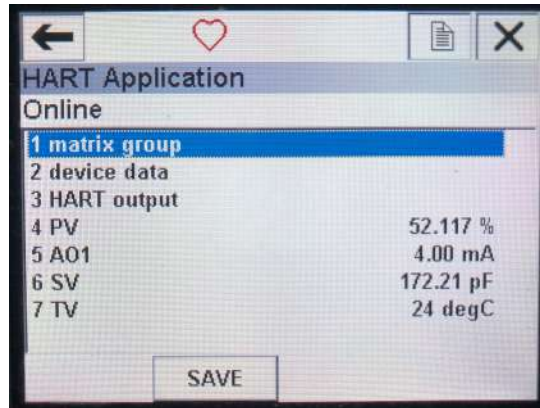


Figura 55: Menú del transmisor Liquicap M FM151. Fuente autor.

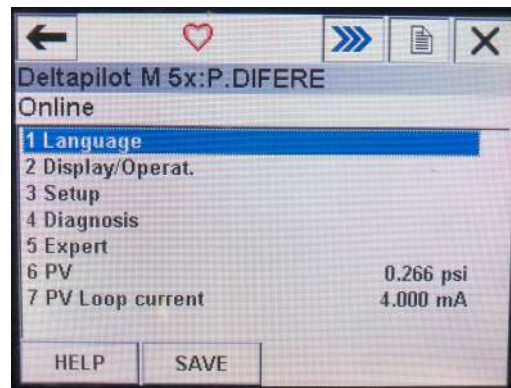


Figura 56: Menú del transmisor Deltapilot M FMB50. Fuente autor.

3.6. Prueba 6. Módulo de nivel utilizando el calibrador secundario de gama baja

Se instaló el software en el computador del módulo de nivel para realizar las pruebas de compatibilidad entre el calibrador de gama baja y los dispositivos HART. Se conectó a la salida multipunto el DDCON100 y se hizo el barrido de reconocimiento como se muestra en la figura 57.

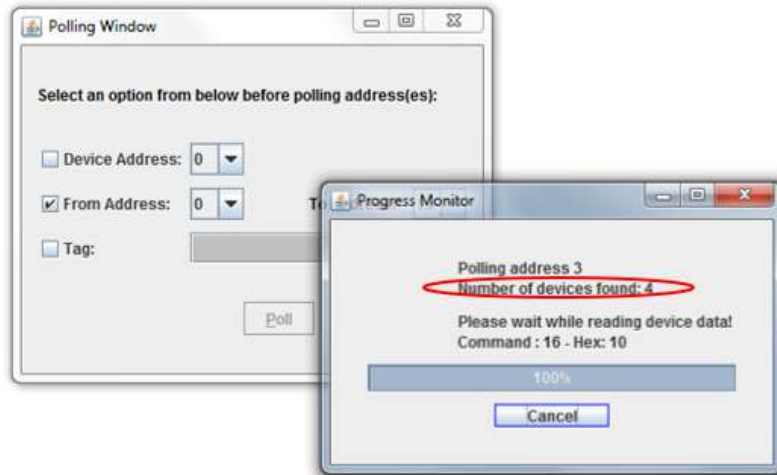


Figura 57: Barrido y reconocimiento de los cuatro transmisores. Fuente autor.

Como se muestra en la figura 58 el software reconoce los dispositivos, pero no tiene las librerías de los modelos de los transmisores porque son de tecnología moderna y solo permite monitorear el estado de los transmisores como se muestra en la figura 59, no es posible realizar cambios en los parámetros o calibrar los dispositivos.

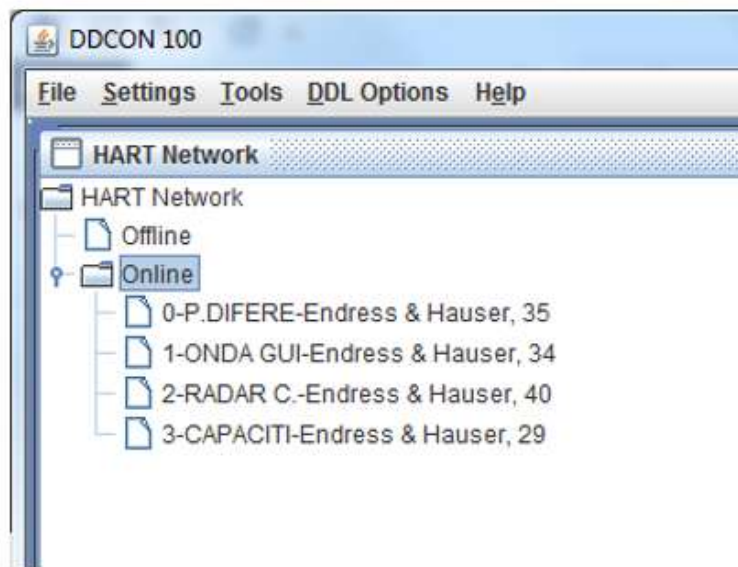


Figura 58: Reconocimiento de los transmisores del módulo de flujo. Fuente autor.



Figura 59: Dispositivos en modo genérico. Fuente autor.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo realizado y las recomendaciones para continuar con esta línea de investigación. Se hace un énfasis en el cumplimiento detallado de los objetivos y en el impacto de este trabajo.

El objetivo general consistió en analizar la compatibilidad entre calibradores maestros secundarios de gama alta y gama baja con equipos HART de diferentes fabricantes. Esto se logro mediante el uso del calibrador de gama alta Rosemount 475 y el calibrador de gama baja DDCON-100 que se tienen en el laboratorio de instrumentación industrial de la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica. Los transmisores de la empresa SMAR ubicados en el modulo de presión fueron compatibles con ambos calibradores. El transmisor Endress & Hauser presente en el primer anillo del banco de flujo tuvo una compatibilidad del 0 % con ambos calibradores. El calibrador de gama alta y baja no tuvieron comunicación con el transmisor PROMAG 50 debido a que este transmisor necesita un calibrador único de la empresa fabricante para lograr una comunicación correcta. Los transmisores estudiados en el modulo de nivel tuvieron compatibilidad del 100 % con el calibrador maestro secundario de gama alta, pero la compatibilidad con el calibrador de gama baja no tuvo el resultado esperado porque el software que se emplea no tiene los modelos de los transmisores actualizados impidiendo una correcta comunicación con los transmisores Endress & Hauser.

En cuanto al problema de comunicación entre el calibrador de gama baja DDCON100

y los transmisores SMAR LD301 y LD291 se lograron corregir los inconvenientes que presentaba el modulo especialmente en el software que no se encontraba actualizado y los drivers no permitían reconocer el DDCON100 en un sistema operativo Windows 7. Se descargaron los drivers de la pagina oficial de la empresa, las pruebas evidencian el correcto funcionamiento del software con los transmisores del modulo de presión. Se logró identificar la compatibilidad entre los diferentes dispositivos HART que se evaluaron, el calibrador secundario de gama alta Rosemount 475 tuvo compatibilidad con todos los dispositivos HART menos con el transmisor Endress & Hauser modelo Promag 50 el cual necesita su propio comunicador de campo y adicionalmente una configuración diferente en el arreglo eléctrico para lograr una correcta lectura. Para el caso del calibrador de gama baja DDCON100, la obsolescencia se debe a la empresa fabricante SMAR debido a que en algún punto deciden no actualizar los drivers y esto genera una incompatibilidad tecnológica con equipos más nuevos del mercado.

Se diseñó la guía que permite a los estudiantes obtener el conocimiento sobre el funcionamiento del comunicador de campo Rosemount 475 para implementarlo como parte de las practicas que se hacen en el laboratorio de instrumentación industrial.

El análisis que se realizó dio resultados que permiten considerar varias acciones futuras. El software del calibrador secundario de gama baja no tiene actualizaciones para sistemas operativos posteriores al Window 7, por esto se recomienda adquirir otro calibrador de gama baja que tenga compatibilidad con los equipos actualizados. Adicional a los problemas técnicos encontrados en el desarrollo de las pruebas, un factor que hace demorar las pruebas es el de que siempre se debe pedir apoyo al departamento de sistemas de la universidad para acceder al usuario de administrador del computador. El calibrador secundario de gama alta Rosemount 475 tendrá soporte hasta Octubre del año 2020 debido a que la empresa ha lanzado el AMS Trex como sucesor el cual ofrece mayores beneficios de tal manera que si se adquiere un equipo posterior a la fecha de limite de soporte no se podrá tener compatibilidad con estos equipos. El transmisor

Endress & Hauser modelo Promag 50 actualmente no presenta fallas o inconvenientes que necesite cambiar o adquirir otro equipo para su correcto funcionamiento, pero se recomienda mirar su comunicador de campo SFX100 de la empresa fabricante del transmisor si se quiere optimizar el proceso utilizando el protocolo HART.

BIBLIOGRAFÍA

- Corporación CDT de gas. (2010). *Perspectiva de análisis tecnológico a los límites de especificación de la calidad del gas natural establecidos en la regulación colombiana*. <https://www.cdtdegas.com/index.php/met-flu/nuestra-revista>. (Consultado: 2019-09-01)
- Hart Communication Foundation. (2015a). *The hartbook*. <https://fieldcommgroup.org/>. (Consultado: 2019-08-06)
- Hart Communication Foundation. (2015b). *Protocol Hart*. <http://www.hartcomm.org/>. (Consultado: 2019-05-26)
- Hart Communication Foundation. (2017). *HART Application guide*. <https://fieldcommgroup.org/>. (Consultado: 2019-08-06)
- Pallás, P. A. (2003). *Sensores y acondicionadores de senal* (4.^a ed.). MARCOMBO, S.A.
- SOLÉ, A. C. (2012). *Instrumentación industrial* (8.^a ed.). Marcombo S.A.

ANEXO A

GUÍA DE MÓDULO DE PRESIÓN

Desarrollada por estudiantes que realizaron el trabajo de grado *Implementación de un módulo de presión relativa con instrumentos mecánicos y electrónicos para el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana* bajo la dirección de Juan Carlos Mantilla Saavedra, MSc.

ANEXO B

GUÍA DE USO DEL CALIBRADOR GAMA ALTA ROSEMONT 475.