

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRESIÓN RELATIVA CON
INSTRUMENTOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS PARA EL LABORATORIO
DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

FELIPE ALARCÓN ARANGO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2015

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRESIÓN RELATIVA CON
INSTRUMENTOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS PARA EL LABORATORIO
DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

FELIPE ALARCÓN ARANGO

PROYECTO DE GRADO

JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
DIRECTOR DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2015

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2015

DEDICATORIA.

Para mi madre Olga Lucia Arango Botero quien fue y siempre será un gran ejemplo de vida para mí y para toda mi familia. Por siempre hacerme ver el lado alegre de las cosas, por siempre llevar esa particular sonrisa y llenar de alegría a todas las personas que le importaron y las que no también. Porque fue una madre ejemplar que nunca dudo en dar ese especial cariño a mí, a mis hermanos y a mi padre y por el excepcional reto que llevo a cabo quien a sus 54 de edad se hizo profesional.

Para mi padre Cesar Augusto Germán Alarcón quien me ha acompañado en todo mi proceso de formación y de vida, por ser un padre ejemplar que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas, porque desde el momento en que nací ha tenido esos detalles tan especiales que ha conmigo y con mis hermanos.

Porque después de la partida de mi madre solo ha tenido tiempo para sacar adelante a mis hermanos y a mí y por qué sé que estará mucho tiempo más con nosotros. Que mejor forma de agradecerle que culminando mis estudios universitarios.

A mis hermanos Juan Camilo Alarcón Arango y Natalia Alarcón Arango que siempre han estado conmigo y que se han convertido en apoyo y compañía constante para seguir adelante. Por qué siempre están y son tomados en cuenta en todas las decisiones importantes que he tomado y tomaré en mi vida, y por qué siempre estaré con ellos.

A mi tía Yesmin Cecilia Pérez Alarcón que ha estado en los mejores y peores momentos y quien fue una persona muy especial para mi madre; siempre brindándole su cariño y compañía.

A mi tío Rafael Arango Botero quien ha sido una persona muy especial para mí y mi familia. Porque el tiempo que hemos pasado en familia ha sido muy valioso y nunca se olvidara. Por su particular sencillez que lo hace una persona muy particular.

A todos los compañeros de estudio que he tenido a lo largo de toda la carrera quienes me han enseñado que el trabajo en equipo es la mejor forma de realizar una tarea, y me han brindado su amistad de forma sincera y desinteresada.

Felipe Alarcón Arango

AGRADECIMIENTOS.

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto. Por su paciencia, colaboración y excepcional calidez humana que han sido de gran ayuda para poder llevar a cabo este trabajo.

A los docentes de la facultad de ingeniería electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes han contribuido a lo largo de todo el proceso de formación como ingeniero y cuyos conocimientos fueron y serán aplicados a lo largo de la vida profesional.

A la ingeniera Leidy Olarte quien siempre ha sacado el espacio para realizar valiosos aportes y cuya colaboración y apoyo ha sido vital para llevar a cabo el montaje del sistema de adquisición de datos.

Al Ingeniero Manuel Guillermo Quijano y a Luis Guilberto Peña quienes con la mejor disposición han contribuido para llevar a cabo este proyecto.

A Ricardo Pazmiño asesor comercial de Swagelok Colombia quien siempre estuvo dispuesto a brindar información necesaria y oportuna.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL DEL MÓDULO DE PRESIÓN.....	2
1.1 PRESIÓN.	2
1.1.1 Definición.	2
1.1.2 Unidades de Medida.....	3
a. Libra Por Pulgada Cuadrada	3
b. Atmósfera.....	3
c. Torr.....	4
d. Baria.....	4
e. Pascal.....	4
f. Bares.....	5
g. Milímetro de Mercurio.....	5
1.1.3 Tipos de Presión.....	5
a. Presión Relativa	6
b. Presión Diferencial.....	6
1.1.4 Elementos para Medir Presión.....	6
a. Manómetro de Tubo Bourdon.....	6
b. Manómetro de Tubo Bourdon con Glicerina	8
c. Elementos Capacitivos.....	8

1.2 PROTOCOLO HART Y LAZO DE CONTROL 4 A 20 mA.....	10
1.3 ESTUDIO METROLÓGICO PRELIMINAR	13
a. Metrología.....	13
b. Magnitud.....	14
c. Unidad de Medida.....	14
d. Medición	14
e. Dispositivo de Medida	14
f. Instrumento de Medida con Dispositivo Indicador	14
g. Instrumento de Medida con Dispositivo Visualizador.....	14
h. Intervalo de Medidas	14
i. Resolución	14
j. Transductor de Medida	15
k. Sensor.....	15
l. Patrón de Medida	15
m. Calibración	15
n. Ajuste de un Sistema de Medida	15
o. Ajuste de Cero de un Sistema de Medida	15
p. Trazabilidad Metrológica	16
q. Incertidumbre de Medida	16
r. Repetibilidad de Medida.....	16
2 IMPLMETACIÓN DEL MÓDULO DE PRESIÓN	17

2.1 REFERENTES DEL ENTORNO INDUSTRIAL.....	17
a. Visitas Técnicas.....	17
b. Pasantía en el Laboratorio de Vibraciones de la UPB Bucaramanga.....	18
2.2 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO.....	22
a. Espacio Físico.....	22
b. Condiciones del Lugar.....	22
c. Servicios Industriales.....	22
2.3 REVISIÓN DE LA INGENIERÍA DE DETALLE.....	28
2.3.1 Aspectos Mecánicos.....	28
a. Manifold del Transmisor de Presión Relativa.....	28
b. Manifold del Transmisor de Presión Diferencial.....	29
c. Racores.31
d. Unión Te.....	34
e. Bomba Manual FLUKE	39
f. Módulo de Presión FLUKE.....	39
g. Protector de Venteo.....	41
h. Uniones.	42
2.3.2 Aspectos Electrónicos.....	44
a. Lazo de Control 4 a 20 mA.....	44
b. Conexión 4 a 20mA + HART.....	45
c. Software DDCON100 para Windows 7.....	46
2.4 MONTAJE DEL MÓDULO DE PRESIÓN.	47

a. Estructura.....	47
b. Montaje de Instrumentos.	48
c. Gabinete de Adquisición de Datos	51
2.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y SEGURIDAD	59
a. Prueba de Estanqueidad.	59
b. Lazo 4 a 20mA y Protocolo HART	61
c. Verificación de Instrumentos.....	64
d. Sistema de Adquisición de Datos.....	70
2.6 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO.....	70
a. Transmisor Indicador de Presión Smar LD-291.	70
b. Transmisor Indicador de Presión Smar LD-301.....	71
c. Manómetros.	72
d. Valvulas de Aguja.....	74
e. Tubo de PFA.....	75
f. Suministro de Aire de Instrumentos	76
g. Filtro Regulador de Presión.	77
h. Reguladores de Presión.....	78
i. Bomba Manual FLUKE.....	79
j. Fuente Externa de 24Vdc.	80
k. Racor Swagelok.....	81
l. Calibrador de Procesos FLUKE 726.....	82
m. Módulo de Presión FLUKE 700p06	84

n. Módulo de Presión FLUKE 700p27.	84
o. Interfaz USB de Configuración Vía HART DDCON100.....	85
p. Diagrama P&ID del Módulo de Presión.....	85
3. Guía de Trabajo.	89
3.1 Prestación de Servicios.....	101
RECOMENDACIONES.....	106
CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	116

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Equivalencia entre las unidades de presión	3
Tabla 2. Datos de Ascenso-Descenso de Presión 1.	98
Tabla 3. Datos de Ascenso-Descenso de Presión 2.	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación del experimento de Torricelli.	5
Figura 2. Representación de los diferentes tipos de presión	7
Figura 3. Ilustración de un manómetro con tubo Bourdon	7
Figura 4. Imagen de la estructura de un manómetro de tubo Bourdon	8
Figura 5. Celda capacitiva de un sensor de presión tipo capacitivo.	9
Figura 6. Representación de la modulación FSK.	11
Figura 7. Comunicación punto a punto vía HART	12
Figura 8. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)	17
Figura 9. Probador de peso muerto hidráulico utilizado en el CDT del gas para calibrar manómetros	19
Figura 10. Probador de peso muerto neumático utilizado en el CDT del gas para calibrar manómetros y transmisores de presión.	19
Figura 11. Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT).....	20
Figura 12. Laboratorio de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana	21
Figura 13. Diseño en SolidWorks del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana	23
Figura 14. Suministro de agua para el laboratorio	24
Figura 15. Toma corrientes	24
Figura 16. Regulador y conexión de aire comprimido	25
Figura 17. Conexión a internet.....	25
Figura 18. Toma corrientes de energía auxiliar	26
Figura 19. Sistema de aire acondicionado	27
Figura 20. Sistema de iluminación del módulo.....	27
Figura 21. Diagrama de un manifold de dos vías.....	30
Figura 22. Estructura interna de un manifold de dos vías.	30
Figura 23. Manifold de dos vías Smar y transmisor de presión relativa	31

Figura 24. Diagrama de un manifold de tres vías.	31
Figura 25. Estructura interna de un manifold de 3 vías.	32
Figura 26. Manifold de 3 vías Smar y transmisor de presión diferencial	32
Figura 27. Racores de ¼ de pulgada NPT	33
Figura 28. Partes de una conexión final.	34
Figura 29. Esquema del sistema de férula y contra férula de los racores Swagelok	35
Figura 30. Racor Swagelok de ¼ de pulgada NPT	35
Figura 31. Unión tipo Te.....	36
Figura 32. Manómetro con unión Te	37
Figura 33. Unión Te Swagelok con manómetro	38
Figura 34. Unión Te Swagelok.....	39
Figura 35. Bomba manual FLUKE 700PTP1	40
Figura 36. Módulo de presión FLUKE 700p27	41
Figura 37. Protector de venteo.....	42
Figura 38. Protector de venteo Swagelok	42
Figura 39. Unión de ½ pulgada.....	43
Figura 40. Unión de ½ pulgada NPT Swagelok	43
Figura 41. Unión de ¼ de pulgada NPT.....	44
Figura 42. Conector hembra de ¼ de pulgada OD por ¼ de pulgada NPT.	45
Figura 43. Conexión del transmisor Smar LD291.	45
Figura 44. Conexión HART del transmisor Smar LD291.	46
Figura 45. Marco estructural del módulo de presión	48
Figura 46. Barra de sujeción de instrumentos.....	48
Figura 47. Manómetros, válvulas y reguladores instalados en el marco del módulo	49
Figura 48. Módulo con todos los instrumentos conectados	50
Figura 49. Accesorios para fijar los reguladores y válvulas	50
Figura 50. Accesorios para fijar las Te Swagelok a la estructura del modulo	51
Figura 51. Gabinete de adquisición de datos.....	52

Figura 52. Diseño en AutoCAD del cableado del sistema de adquisición de datos	53
Figura 53. Capas realizadas para el diseño en AutoCAD del sistema de adquisición de datos	54
Figura 54. Parada de emergencia.....	54
Figura 55. Interruptor Schneider	54
Figura 56. Protección para el chasis NI cDAQ-9174.....	55
Figura 57. Protección para la fuente de 24V	55
Figura 58. Instalación de canales, rieles e instrumentos en el doble fondo del gabinete del sistema de adquisición de datos	56
Figura 59. Cableado del Interruptor, fuente de 24 V y chasis NI cDAQ-9174	56
Figura 60. Caja para conectar los terminales del configurador HART y osciloscopio	57
Figura 61. Forma de conexión para la adquisición de la corriente 4 a 20mA de los transmisores	58
Figura 62. Panel frontal en LabView	59
Figura 63. Diagrama de bloques	60
Figura 64. Bloque Sample Compression.....	61
Figura 65. Líquido detector de fugas.....	62
Figura 66. Corriente indicada por el transmisor de presión relativa y por el programa realizado en LabVIEW	63
Figura 67. Corriente indicada por el transmisor de presión diferencial y por el programa realizado en LabVIEW	64
Figura 68. Presión y corriente Indicadas por el software DDCON100 para el transmisor de presión relativa	65
Figura 69. Presión y corriente Indicadas por el software DDCON100 para el transmisor de presión diferencial	66
Figura 70. Grafica de la presión, corriente y porcentaje de rango para el transmisor de presión relativa	67

Figura 71. Grafica de la presión, corriente y porcentaje de rango para el transmisor de presión diferencial.	68
Figura 72. Lectura de la presión del módulo de presión FLUKE y el transmisor de presión relativa.....	69
Figura 73. Transmisor indicador de presión Smar LD-291.	71
Figura 74. Transmisor indicador de presión Smar LD291.	72
Figura 75. Manómetro Swagelok.	73
Figura 76. Coeficiente de caudal, válvulas de aguja Swagelok serie 1.	74
Figura 77. Válvula de aguja Swagelok.	75
Figura 78. Manguera de PFA.	76
Figura 79. Esquema básico del sistema de suministro de aire de instrumentos, edificio K.	77
Figura 80. Filtro regulador NORGREN.	78
Figura 81. Regulador de presión Swagelok.	79
Figura 82. Bomba manual FLUKE 700PTP1	80
Figura 83. Fuente externa de 24VDC SIEMENS SITOP PSU100C.....	81
Figura 84. Racor Swagelok.....	82
Figura 85. Calibrador de Procesos FLUKE 726.	83
Figura 86. Módulo de presión FLUKE 700p06.	84
Figura 87. Modem HART DDCON100.	86
Figura 88. Ambiente de trabajo del software DDCON100.....	87
Figura 89. P&ID del módulo de presión	88
Figura 90. Bomba de presión Fluke serie 700 PTP.....	90
Figura 91. Módulo de presión.....	91
Figura 92. Conexión eléctrica para implementar lazo 4 a 20 mA + protocolo HART	92
Figura 93. Lugar de conexión de los terminales del configurador HART para los transmisores de presión.....	92
Figura 94. Válvulas del manifold de presión diferencial	93
Figura 95. Escala de preload	93

Figura 96. Verificar conexión.....	94
Figura 97. Verificar auto poll	95
Figura 98. Opciones para búsqueda de equipos.....	96
Figura 99. Menú de ajuste	97
Figura 100. Graficas de repetibilidad e histéresis.	101
Figura 101. Estudiante de la especialización en control e instrumentación industrial realizando las prácticas de laboratorio con el módulo de presión.	102
Figura 102. Imágenes de la trama del protocolo HART suministradas a un estudiante de la especialización en control e instrumentación industrial para su monografía.....	103
Figura 103. Filtros reguladores instalados en el laboratorio de instrumentación.	104
Figura 104. Productos del stand de Swagelok.	105

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Especificaciones técnicas módulo de presión FLUKE 700p06 (cd)

Anexo B. Especificaciones técnicas módulo de presión FLUKE 700p27 (cd)

Anexo C. Especificaciones técnicas de manómetros Swagelok (cd)

Anexo D. Especificaciones técnicas de reguladores de presión y válvulas Swagelok (cd)

Anexo E. Especificaciones técnicas del transmisor de presión relativa Smar-LD291 (cd)

Anexo F. Especificaciones técnicas del transmisor de presión diferencial Smar LD-301(cd)

Anexo G. Especificaciones técnicas de la bomba manual FLUKE 700PTP1 (cd)

Anexo H. Especificaciones técnicas del calibrador de procesos FLUKE 726 (cd)

Anexo I. Especificaciones del sistema adquisición de datos (cd)

GLOSARIO

Estanqueidad: indica la impermeabilidad de una estructura o mecanizado dado para evitar la entrada o salida de un fluido.[62]

HART: (Highway Addressable Remote Transducer), Transductor Remoto Direccionable en Red.

ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICP: Instituto Colombiano del Petróleo.

INM: Instituto Nacional de Metrología.

ISO: Organización de Estándares Internacionales.

NTC: Norma Técnica Colombiana, emanada por el ICONTEC.

PFA: hace referencia al material Perfluoroalcohexil en el cual se basada la construcción de la manguera tubo marca Swagelok.

Tag: Dirección o identificación de instrumento.

PT: Según la norma ANSI/ISA-5.1 hace referencia a un transmisor de presión.

PDT: Según la norma ANSI/ISA-5.1 hace referencia a un transmisor diferencial de presión.

Transmisor: Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua o bien digital. [16]

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRESIÓN RELATIVA CON INSTRUMENTOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS PARA EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA.

AUTOR: FELIPE ALARCÓN ARANGO.

FACULTAD: INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA.

RESUMEN

Se implementó un Módulo de Presión Relativa mediante instrumentos mecánicos y electrónicos con el cual se da soporte a prácticas de laboratorio de las facultades de Ingeniería Electrónica, Mecánica e Industrial, en sus pregrados y posgrados.

El módulo cuenta con instrumentos mecánicos como manómetros e instrumentos electrónicos como un transmisor indicador de presión relativa y un transmisor indicador de presión diferencial, los cuales se conectan con un circuito de control 4 a 20 mA y su comunicación es vía protocolo HART. Con este tipo de conexión se puede monitorear desde el computador del módulo la presión de los transmisores presentes en el circuito, además se puede visualizar el estado de cada transmisor, verificar si alguno tiene fallas y hasta ajustar diferentes parámetros de cada sensor.

Igualmente se cuenta con dos módulos de presión FLUKE, los cuales tienen certificado de calibración y son los instrumentos patrones presentes en el módulo. Para la correcta lectura de la información aportada por estos módulos se cuenta con un calibrador de procesos FLUKE 726, el cual es un instrumento tipo industrial con excelentes prestaciones y especificaciones.

Para la manipulación de los instrumentos y del módulo en general se realizó una guía de trabajo en la cual se presenta paso a paso el procedimiento para la conexión HART de cada transmisor, al igual que la configuración de calibrador de procesos FLUKE 726 para poder visualizar la presión de cada módulo de presión FLUKE.

PALABRAS CLAVE: Calibración, instrumento, medición, metrología, presión, tubo Bourdon.

V°B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: IMPLEMENTATION OF A MODULE OF RELATIVE PRESSURE THROUGH ELECTRONIC AND MECHANICAL INSTRUMENT FOR THE UNNIVERSIDAD PONTIFIA BOLIVANIANA'S INSTRUMENTATION LABORATORY

AUTHOR: FELIPE ALARCÓN ARANGO.

FACULTY: ELECTRONIC ENGINEERING.

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA.

ABSTRACT

Was implemented a module of relative pressure trough mechanic and electronic instruments which support the laboratory practices of electronic, mechanic and industrial faculty in its undergrad and graduate programs.

The module has mechanic instruments such as manometers and electronic instruments like a relative pressure transmitter indicator and a differential pressure transmitter indicator, which connects with a 4 to 40 mA control circuit and its communication is by HART protocol. With this type of connection it's possible to monitor the pressure of the transmitters present in de circuit by the computer of de module, in addition can be displayed the state of each transmitter, verify if someone of it have some flaws and even adjust the parameters of each sensor.

In the same way it counts with two FLUKE pressure modules which have calibration certificate and are the patron instruments of the module. For the correct reading of the information provided by those modules counts with a FLUKE 726 process calibrator which is an industrial type instrument with excellent performance and specifications.

For the handling of the instruments and the module it was generated a work guide in which is presented step by step the procedure for the Hart connection of each transmitter as the configuration of the FLUKE 726 process calibrator for the visualization of the pressure of each module.

KEYWORDS: Calibration, instrument, measurement, metrology, pressure, Metrology, pressure, Bourdon tube.

V°B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La industria nacional ha tenido un crecimiento tan acelerado durante los últimos años, que está a la vanguardia de los últimos adelantos tecnológicos, pero para estar en este punto ha sido necesario un proceso de tecnificación igualmente acelerado, proceso en el cual ha sido indispensable llevar el control y visualización sobre todas las variables implicadas en la transformación de la materia prima, esto con el fin de reducir costos y optimizar los procesos productivos.

La variable presión juega un papel muy importante en este auge industrial ya que mediante esta se puede inferir parámetros como; flujo, nivel y caudal.

Teniendo en cuenta que esta es una de las variables fundamentales en todo proceso industrial, se implementó un módulo de presión relativa para el estudio de la variable, mediante instrumentos mecánicos y electrónicos con el fin de dar soporte a prácticas de laboratorio de las facultades de Ingeniería Electrónica, Mecánica e Industrial, en sus pregrados y posgrados.

Para llevar a cabo este proyecto primero se realizó una revisión detallada de la fase anterior del proyecto en la cual se diseñó la estructura del módulo y se seleccionaron parte de los instrumentos y accesorios a utilizar. Después de esto se instalaron los sensores electrónicos y mecánicos con los cuales se realizaron sus respectivas pruebas de estanqueidad y funcionamiento. Finalmente se implementó un gabinete de adquisición de datos mediante el cual se puede visualizar en una HMI la información indicada por cada transmisor.

1. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL DEL MÓDULO DE PRESIÓN.

1.1. PRESIÓN

La variable presión es una magnitud que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie. Esta variable es medida en el sistema internacional de unidades mediante el Pascal (Pa) el cual es equivalente a una fuerza de 1 Newton aplicada uniformemente en un metro cuadrado. En el sistema inglés se mide en libra por pulgada cuadrada o psi que equivale a una fuerza de una libra ejercida sobre una pulgada cuadrada. ¹

1.1.1 Definición

La presión es una magnitud que evidencia la forma como se divide la fuerza sobre la superficie en la cual es aplicada. De este modo se puede calcular la presión mediante el cociente entre la intensidad de la fuerza y el área de la superficie. ²

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 1}$$

En el sistema internacional de unidades, la presión se mide mediante el Pascal, el cual equivale a un Newton por metro cuadrado en donde el Newton es la fuerza que se aplica a un cuerpo de 1 Kg de masa y le comunica una aceleración de $1 \frac{m}{s^2}$. ¹

En el sistema Inglés de unidades la presión se mide en libras por pulgada cuadrada o psi que corresponde a una fuerza de una libra ejercida sobre una pulgada cuadrada. ¹

¹ CREUS Solé Antonio. Instrumentación industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. 792 p. ISBN 978-607-707-042-9

² Luetich J. J. UNIDADES DE PRESIÓN. [en línea] < <http://www.luenticus.org/articulos/03A001/index.html> > [citado en 9 de Agosto de 2015]

1.1.2 Unidades de Medida

Dependiendo de la aplicación en la cual se esté trabajando existen varias unidades para expresar la variable presión. En la **Tabla 1** se presentan estas equivalencias.

Tabla 1. Equivalencia entre las unidades de presión ³

	Psi	Pulgada c. de agua	Pulgada c. de Hg	Atmósfera	Kg/cm^2	Cm c. de a	Mm c. de Hg	Bar	Pa
Psi	1	27,68	2,036	0,068	0,0703	70,31	51,72	0,0689	6894,76
Pulgada c. de agua	0,0361	1	0,0735	0,0024	0,0025	2,54	1,868	0,0024	249
Pulgada c. de Hg	0,04912	13,6	1	0,0334	0,0345	34,53	25,4	0,0338	3386,39
Atmósfera	14,7	406,79	29,92	1	1,033	1033	760	1,0232	$1,0133 \times 10^5$
Kg/cm^2	14,22	393,7	28,96	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98066
Cm c. de a	0,0142	0,3937	0,0289	0,0096	0,001	1	0,7355	0,009	98,6
Mm c. de Hg	0,0193	0,5353	0,0393	0,0013	0,0013	1,359	1	0,00133	133,322
Bar	14,5	401	29,53	0,0987	1,02	1020	750	1	10^5
Pa	0,00014	0,004	0,00029	$0,987 \times 10^{-15}$	$0,102 \times 10^{-4}$	0,01	0,0075	10^{-5}	1

Fuente: CREUS Solé Antonio. Instrumentación Industrial.

a. Libras por Pulgada Cuadrada (psi): La unidad psi tiene dos variaciones; psia (psi absolutos) y psig (psi medidos). El psia se mide con respecto al cero absoluto y el psig es medido respecto a una presión relativa que generalmente es la presión atmosférica. La mayoría de manómetros realizan su medición con respecto a la presión atmosférica, de este modo cuando estos indican cero quiere decir que la presión es la de la atmosfera.³

b. Atmósfera: La enorme cantidad de aire atmosférico que existe sobre cualquier punto de la tierra provoca que la presión ejercida en ese punto tenga una magnitud. Ese valor de presión recibe el nombre de presión atmosférica y es expresada como atm.⁴

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ KPa}$$

³ CREUS. Op. cit., p. 2.

⁴ PROFESOR EN LINEA, presión atmosférica [En línea] <
<http://www.profesorenlinea.cl/fisica/PresionAtmosferica.htm> [Citado en 9 de agosto de 2015]

c. Torr: Fue la primera unidad utilizada para medir la presión atmosférica y su nombre viene del experimento realizado por Torricelli en el cual utilizo una cubeta llena de mercurio en la que sumergió un tubo de vidrio que se encontraba lleno de este líquido, esta columna descendía hasta una altura haciendo que el sistema quedara en equilibrio. Esta altura fue de 760 mm de mercurio. ⁵

$$760 \text{ Torr} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa}$$

En la **Figura 1** se muestra una representación de este experimento.

d. Baria: Esta unidad pertenece al sistema Cegesimal de unidades, no existe un símbolo determinado para representarla ya que se designa con su propio nombre. Una baria es definida como una fuerza de una dina ejercida sobre una superficie de un centímetro cuadrado. Ya que esta unidad es muy pequeña se decidió usar una unidad un millón de veces mayor a esta; el bar. ⁶

$$1 \text{ baria} = 0,10 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 1\,000.000 \text{ baria} = 100 \text{ kPa}$$

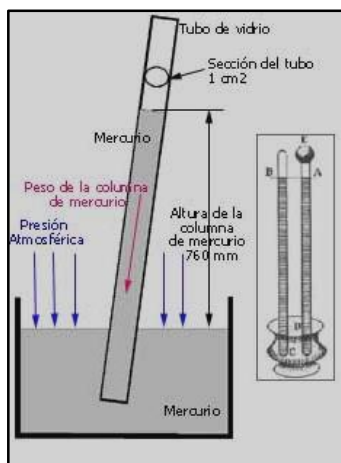
e. Pascal: Es la unidad de medida del sistema internacional de unidades y se simboliza como Pa. Recibe su nombre en honor al físico y matemático francés Blaise Pascal. El Pascal se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 Newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a esta misma. ⁷

⁵ MASMAR, METROLOGÍA NAUTICA, unidades de presión [En línea] <<http://www.masmar.com/articulos/art/114,1630,2.html>> [Citado en 9 de agosto de 2015]

⁶ ECURED CONOCIMIENTO CON TODOS Y PARA TODOS, Baria(unidad) [En línea] <[http://www.ecured.cu/index.php/Baria_\(unidad\)](http://www.ecured.cu/index.php/Baria_(unidad))> [Citado en 9 de agosto de 2015]

⁷ ECURED. Pascal (unidad) [en línea] [http://www.ecured.cu/index.php/Pascal_\(unidad\)](http://www.ecured.cu/index.php/Pascal_(unidad)) [Citado en 11 de agosto de 2015]

Figura 1. Representación del experimento de Torricelli. ⁸



Fuente: MASMAR, METROLOGÍA NAUTICA, unidades de presión

- f. Bares:** Se denomina bar a la unidad de presión que equivale a un millón de barias. Su símbolo es bar y viene de la palabra en griego “báros” que significa peso. Normalmente la presión atmosférica se da en milibares. A continuación se presenta una relación de esta unidad. ⁹

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ barias}$$

- g. Milímetros de mercurio:** Es la presión ejercida por una columna de un milímetro de mercurio. Fue descubierta por Torricelli y también se le llama Torr. ¹⁰

1.1.2 Tipos de Presión

En el presente módulo de presión se trabajan únicamente con presiones relativas y diferenciales.

⁸ Ibid., p. 4.

⁹ MASMAR. Op. cit., p. 4.

¹⁰ TIPOSDE.ORG PORTAL EDUCATIVO. Tipos de presión [En línea] <<http://www.tiposde.org/ciencias-naturales/357-tipos-de-presion/>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

- **Presión Relativa:** Se mide teniendo en cuenta la presión atmosférica; Mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica. Este tipo de presión es la medida por los manómetros y solo se aplica cuando la presión a medir es superior a la atmosférica. ¹¹
- **Presión Diferencial:** Es el resultado de la diferencia de dos medidas de presión la cuales tienen el mismo cero de referencia. El vacío es la diferencia entre la presión atmosférica existente en un lugar determinado y la presión absoluta. ¹²

En la **Figura 2** se muestra una representación de los diferentes tipos de presión

1.1.3 Elementos para Medir Presión

Los instrumentos utilizados para realizar las medidas de presión en el módulo implementado son: manómetros de tubo Bourdon e instrumentos capacitivos.

- Manómetros de Tubo Bourdon:** Consiste en un tubo se sección elíptica en forma de anillo casi completo y cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, este tiende a enderezarse y el movimiento se transmite a una aguja indicadora por medio de un sector dentado y un piñón. ^{13 14}

En las **Figuras 3 y 4** se presentan unas imágenes de este tipo de manómetro.

Aunque los manómetros soporten la máxima presión indicada se recomienda que el intervalo se operación sea entre el 25 y el 75%. ¹⁵

¹¹ TIPOSDE.ORG. Op. cit., p. 5.

¹² CABREBA RICARDO. PRESIONES ABSOLUTAS Y RELATIVAS [En línea] <http://ricuti.com.ar/No_me_salén/FLUIDOS/FT_baromet.html> [Citado en 10 de agosto de 2015]

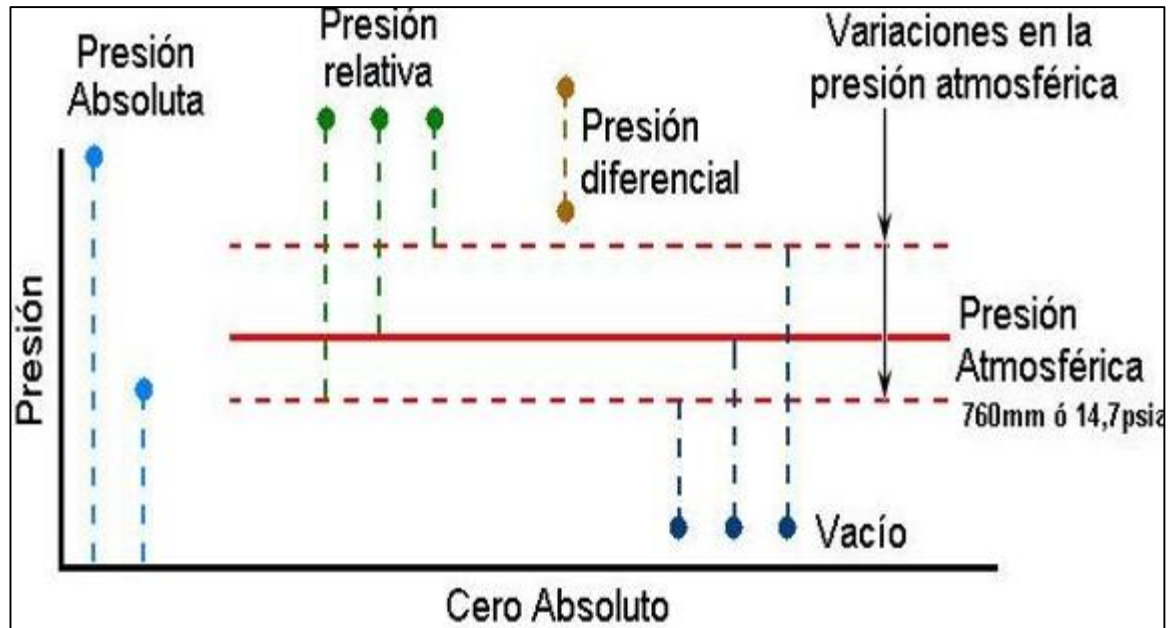
¹³ SAPIENSMAN. Conceptos básicos de neumática e hidráulica, dispositivos de control y medida de la presión [En línea] <<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

¹⁴ BURGOS Tomás. Manómetros [en línea] <<http://www.sabelotodo.org/aparatos/manometros.html>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

¹⁵ DE WIT, Orientación para la selección e instalación de manómetros [En línea]

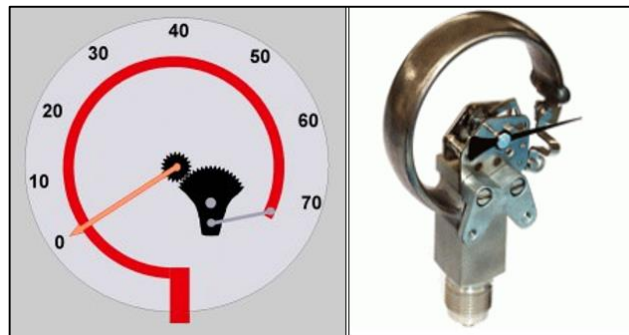
<http://www.cari.com.mx/Catalogos/Catalogo_De_Wit_Completo.pdf> [Citado en 10 de agosto de 2015]

Figura 2. Representación de los diferentes tipos de presión ¹⁶



Fuente: CREUS Solé Antonio. Instrumentación Industrial.

Figura 3. Ilustración de un manómetro con tubo Bourdon ^{17 18}



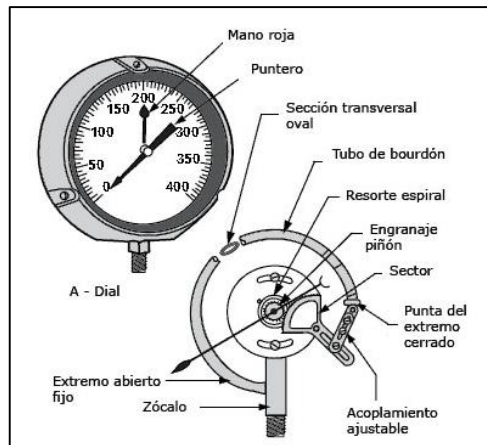
Fuente: Tomás Burgos, Manómetros. BLOGINSTRUMENTACION, Sistemas de instrumentación de presión mecánica.

¹⁶ CREUS. Op. cit., p. 3.

¹⁷ BURGOS. Op. cit., p. 6.

¹⁸ BLOGINSTRUMENTACION. Sistemas de instrumentación de presión mecánica [en línea] <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2012/03/16/sistemas-de-instrumentacion-de-presion-mecanica/#!prettyPhoto>> [citado en 24 de agosto de 2015]

Figura 4. Imagen de la estructura de un manómetro de tubo Bourdon ¹⁹



Fuente: Sapiensman. Conceptos básicos de neumática e hidráulica, dispositivos de control y medida de la presión

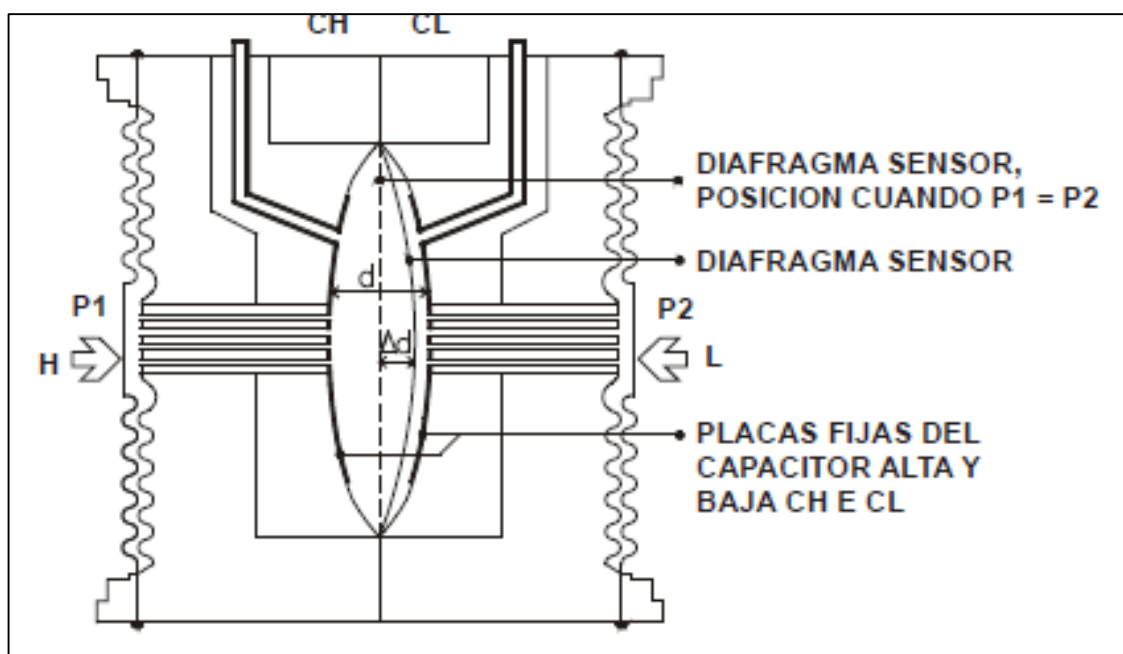
- b. Manómetros de Tubo Bourdon con Glicerina:** Su funcionamiento es el mismo que el manómetro de Bourdon sin glicerina, pero la presencia de este líquido tiene como beneficio que minimiza el desgaste, lubricando todos los elementos móviles del mecanismo. Igualmente para el usuario es muy útil un manómetro de estos porque asegura la legibilidad de la caratula previniendo de esta manera la distorsión de la escala de la caratula o que el cristal se empañe. En general un manómetro con glicerina tiene una vida más prolongada que uno sin este líquido. ²⁰
- c. Elementos Capacitivos:** Se basan en el cambio de capacidad que se produce en un condensador cuando sus placas se desplazan por la aplicación de presión. La placa móvil está situada entre dos capas fijas. En total se tienen dos condensadores; uno de capacitancia fija y otro de capacitancia variable. Estas capacitancias se pueden comparar mediante el uso de circuitos oscilantes o un puente de Wheastone alimentado con A.C ²¹

¹⁹ SAPIESMAN. Op. cit., p. 6.

²⁰ DE WIT. Op. cit., p. 6.

²¹ CREUS. Op. cit., p. 7.

Figura 5. Celda capacitiva de un sensor de presión tipo capacitivo.²²



Fuente: Smar LD291 INTELLIGENT PRESSURE TRANSMITTER

P1 y P2 corresponden a las presiones aplicadas al sensor, CH a la capacitancia entre la placa fija en el lado P1 y el diafragma del sensor, CL es la capacitancia entre la placa fija en el lado P2 y el diafragma del sensor. d corresponde a la distancia entre las placas fijas CH y CL y Δd es la distancia entre las placas fijas CH y CL.

La capacitancia de un condensador de placas planas y paralelas se expresa como una función del área de la placa y la distancia entre las placas con la siguiente expresión:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad \text{Ec. 2}$$

²² Smar LD291 INTELLIGENT PRESSURE TRANSMITTER, manual de instrucciones, operación y mantenimiento, Versión 6, 2012

Donde:

- ϵ es la constante dieléctrica del medio presente entre las placas del capacitor.
- A es el área de las placas paralelas.
- d es la distancia entre las placas

1.2 PROTOCOLO HART Y LAZO DE CONTROL 4 A 20 mA

La forma más popular para transmitir las señales en la industria es el estándar 4 a 20 mA. Esta señal de corriente se usa proporcionalmente para la representación de las señales o variables medidas. El valor de 4 mA representa el 0% de la señal medida y 20 mA el 100%.²³

La ventaja de utilizar este tipo de comunicación es que ofrece una mayor resistencia contra efectos electromagnéticos que las señales de tensión, debido que las perturbaciones electromagnéticas se representan en variaciones de voltaje y las alteraciones en corriente son pocas. Si el cable es cortado se detecta por una corriente menor a 3,8 mA y si se presenta un cortocircuito se presenta una señal de 20,5 mA.²⁴

- **Protocolo HART:** La palabra HART viene del acrónimo en inglés (Transductor Remoto Direccional en Red). Este protocolo de comunicación funciona mediante la modulación por desplazamiento de frecuencia FSK para sobreponer señales digitales sobre una de 4 a 20 mA.²⁵

²³ VILLAJUNCA JOSÉ CARLOS. La señal 4-20mA y su proporción a variables físicas: nunca esta de mas repararlo. [en línea] < <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/curso-practico-de-instrumentacion/item/345-la-se%C3%B1al-4-20ma-y-su-proporci%C3%B3n-a-variables-fisicas-nunca-esta-de-mas-repararlo.html> > [citado en 10 de agosto de 2015]

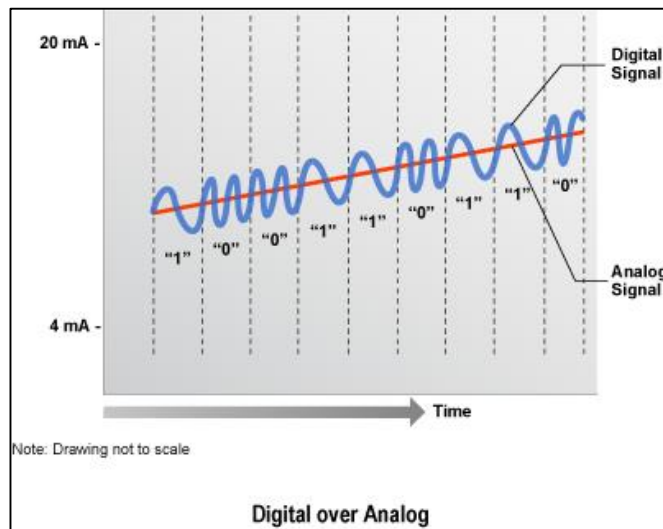
²⁴ BLOG INSTRUMENTACIÓN.COM. señales de salida analógicas en la instrumentación [en línea]. <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2011/09/08/senales-de-salida-analogicas-en-la-instrumentacion/>> [citado en 10 de agosto de 2015]

²⁵ HART COMMUNICATION FOUNDATION. Cómo funciona HART [en línea] <http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html> [citado en 10 de agosto de 2015]

En la **Figura 6** se presenta un esquema de la modulación FSK

La comunicación HART es un protocolo maestro/servidor, esto quiere decir que un dispositivo inteligente solo habla cuando el maestro se lo pide. Este protocolo se puede utilizar de diferentes maneras; punto a punto o multipunto para comunicarse desde y hacia los instrumentos en campo y desde el control central.

Figura 6. Representación de la modulación FSK. ²⁶



Fuente: HART COMMUNICATION FOUNDATION, Cómo funciona HART

La comunicación HART se realiza entre dos o más dispositivos compatibles con HART, generalmente un dispositivo inteligente en campo y un sistema de monitoreo. El intercambio de datos se realiza mediante un cable de instrumentación estándar y el uso de prácticas de cableado convencionales. ²⁶

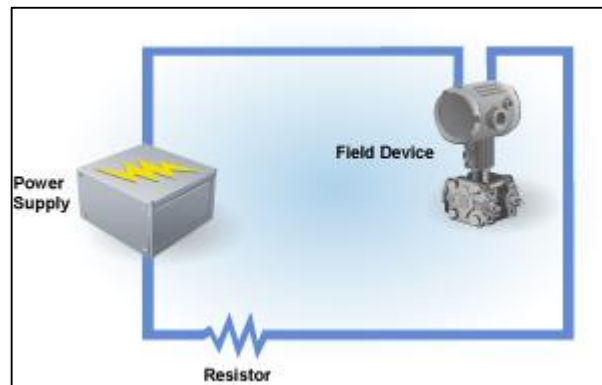
Para comunicarse vía HART se necesita una resistencia generalmente de 250 Ohm ya que el dispositivo receptor debe ser sensible a valores de tensión. La caída de

²⁶ HART COMMUNICATION FOUNDATION. Op. cit., p. 10.

voltaje se presenta en los dos extremos de la resistencia. En la **Figura 7** se muestra una imagen de una comunicación punto a punto vía HART.

A continuación se enuncian las características de una comunicación mediante el lazo 4 a 20 mA y el protocolo HART

Figura 7. Comunicación punto a punto vía HART ²⁷



Fuente: HART COMMUNICATION FOUNDATION, Cómo funciona HART

Características del Lazo 4 a 20 mA + Protocolo HART:

- La información digital puede viajar en ambas direcciones usando la comunicación HART. ²⁷
- Todos los dispositivos y sistemas que son compatibles con HART pueden trabajar juntos sin importar de que proveedor sean. ²⁸
- El valor de la corriente no es afectado en todo el lazo por las caídas del voltaje en el cable. ²⁸
- Es inmune a muchos de los tipos de ruido que interfieren en las comunicaciones convencionales. ²⁸

²⁷ EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Introducción al HART [en línea] http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Buses_201_es.pdf [citado en 10 de agosto de 2015]

²⁸ HART COMMUNICATION FOUNDATION. Op. cit., p. 11.

- Las frecuencias de funcionamiento utilizadas por el modem que permite la comunicación HART son: ²⁹

2200 Hz= 0 Lógico

1200 Hz= 1 Lógico

- La comunicación HART permite verificar el estado de los dispositivos y realizar diagnósticos, con el fin de saber si el valor esta fuera de los límites máximos del dispositivo o fuera de rango. Esto permite configurar las alarmas de alto o bajo. ²⁹
- Es posible implementar un lazo con longitud máxima de 3000 metros con par trenzado y 1000 metros con par trenzado múltiple, pero es necesario tener en cuenta la calidad de las conexiones, ya que las caídas en tención pueden afectar las variaciones en frecuencia. ²⁹
- Reducción de riesgo y accidentes por medio de un protocolo robusto y preciso. ²⁹
- Un transmisor que solo envía una variable de proceso también puede recibir información como ajustes de configuración. ²⁹
- Con un solo par de hilos se pueden manejar múltiples variables; un transmisor puede manejar entradas de diferentes sensores. ²⁹
- No existe el peligro de limitarse con estándares específicos a un proveedor ya que la tecnología HART no es propiedad de alguna compañía, es administrada por HART Communications Foundation que es una fundación independiente. ²⁹

1.3 ESTUDIO METROLOGICO PRELIMINAR

- a. Metrología:** La metrología es la ciencia encargada de las mediciones, unidades de medida y equipos utilizados para efectuarlas, así como de su verificación y calibración periódica. ³⁰

²⁹ EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Op. cit., p. 12.

³⁰ CELSIUS SMART. Que es la metrología [en línea] <http://www.celsiusmetrologia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=36:ique-es-la-metrologia&catid=13:noticias&Itemid=40> [citado en 10 de agosto de 2015]

- b. Magnitud:** Es la propiedad de un cuerpo, sustancia o fenómeno, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia. ³¹

- c. Unidad de Medida:** Es una magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la cual se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas por medio de un número. ³¹

- d. Medición:** Proceso en el cual se obtiene experimentalmente uno o varios valores que se pueden atribuir razonablemente a una magnitud. ³¹

- e. Dispositivo de Medida:** Instrumento que se utiliza para realizar mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos suplementarios. ³¹

- f. Instrumento de Medida con Dispositivo Indicador:** Es un instrumento de medida que produce una señal de salida con la información sobre el valor de la magnitud medida. ³¹

- g. Instrumento de Medida con Dispositivo Visualizador:** Instrumento indicador en el cual la señal de salida se presenta en forma visual. ³¹

- h. Intervalo de Medida:** Corresponde al conjunto de valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento o sistema de medida puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en condiciones determinadas. ³¹

- i. Resolución:** Es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación apreciable en la indicación correspondiente. ³¹

³¹ VIM. VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y GENERALES, Y TÉRMINOS ASOCIADOS [en línea] <<http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>> [citado en 10 de agosto de 2015]

- j. Transductor de Medida:** Dispositivo utilizado en medición, que hace corresponder una magnitud de entrada a una magnitud de salida, según una relación preestablecida. ³²
- k. Sensor:** Hace referencia al elemento de un sistema de medida directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portadora de la magnitud a medir. ³²
- l. Patrón de Medida:** Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor establecido y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia. ³²
- m. Calibración:** Es la operación que, bajo condiciones especificadas, establece en una primera fase una relación entre los valores y sus respectivas incertidumbres de medida obtenidas a partir de los patrones y en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación. ³²
- n. Ajuste de un Sistema de Medida:** Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir. ³²
- o. Ajuste de Cero de un Sistema de Medida:** Ajuste de un sistema de medida para que este proporcione una indicación nula cuando la magnitud a medir tenga valor cero. ³²

³² Ibid., p. 14.

- p. Trazabilidad Metrológica:** Es la propiedad de los resultados de medida por la que se pueden relacionar con una referencia mediante una cadena documentada de calibración. Esta propiedad brinda información que contribuye a la incertidumbre de medida.³³
- q. Incertidumbre de Medida:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.³³
- r. Repetibilidad de Medida:** Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.³³

³³ Ibid., p. 16.

2. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE PRESIÓN.

2.1 REFERENTES DEL ENTORNO INDUSTRIAL

- a. **Visitas técnicas:** Las visitas técnicas realizadas tuvieron como fin el recopilar información sobre temas como: equipos utilizados, metrología, estándares y métodos de calibración.
- **Visita técnica al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)**

Figura 8. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)



Esta institución utiliza probadores de peso muerto neumáticos para calibrar manómetros de presión y usa como referencia la guía de calibración de medidores de presión DKD_R_6_1.

En el laboratorio se trabaja con presiones de hasta 5000 psi, por este motivo las válvulas, racores y manifold utilizados son marca HIP que son los productos líderes en el mercado para trabajar con altas presiones.

Igualmente los calibradores de proceso y bombas utilizadas en este establecimiento son marca BEAMEX, los cuales cuentan con certificado de calibración.

Debido a políticas internas de esta institución no se pudo tener un registro fotográfico de los equipos utilizados en el laboratorio de presión, pero por medio de esta visita se pudo solucionar el problema de fugas que se tenía ya que en este laboratorio se recomendó la implementación del sistema de férula y contra férula de Swagelok.

- **Visita técnica al Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas)**

El CDT de gas se encuentra acreditado bajo la norma ISO 17025 y los instrumentos para medir presión se calibran mediante la guía para calibración de medidores de presión DKD_R_6_1.

En este laboratorio se utilizan probadores de peso muerto hidráulicos para calibrar manómetros de altas presiones. En la **Figura 9** se presenta una imagen de este instrumento.

Otro instrumento utilizado para calibrar manómetros y transmisores de presión es el probador de peso muerto neumático. En la **Figura 10** se presenta la imagen de este aparato.

b. Pasantía en el Laboratorio de Vibraciones de la UPB Bucaramanga: La pasantía se realizó en el laboratorio de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. Este laboratorio cuenta con el servicio de calibración de instrumentos de medición de vibraciones, incluidos los utilizados para el monitoreo y diagnóstico de confiabilidad de maquinaria.³⁴

³⁴ Universidad Pontificia Bolivariana. Laboratorio de Vibraciones [en línea] <<http://vibra.upbbga.edu.co/index.html>> [Citado en 28 de agosto de 2015]

Para realizar las calibraciones se aplica la norma ISO 16063-21 y se complementa con las recomendaciones de la norma API 670.³⁵

Figura 9. Probador de peso muerto hidráulico utilizado en el CDT del gas para calibrar manómetros

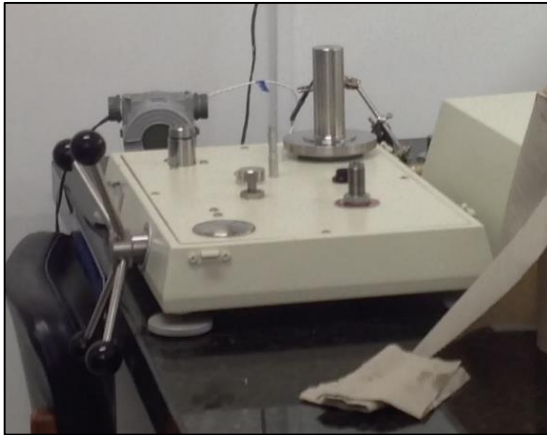
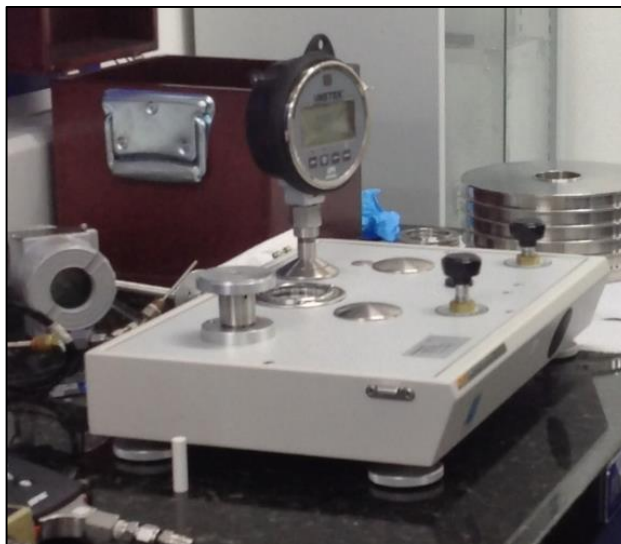


Figura 10. Probador de peso muerto neumático utilizado en el CDT del gas para calibrar manómetros y transmisores de presión.



³⁵ Ibid., p. 18.

Figura 11. Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT)



Este laboratorio presta servicios a la facultad de ingeniería mecánica con el curso optativo de vibraciones que se ofrece según la norma ISO 18436-2 para el analista de vibraciones Nivel II.

También ofrece cursos especializados a la medida de las necesidades de clientes empresariales.

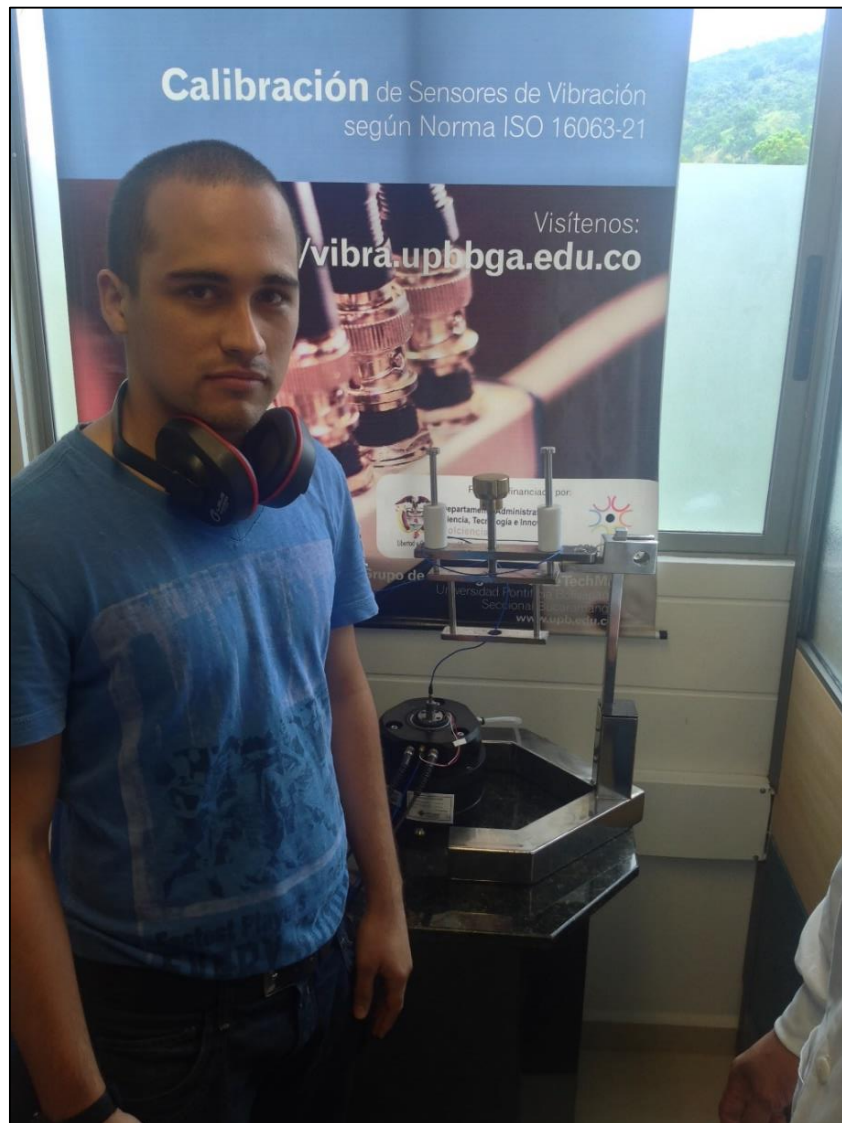
En esta pasantía se llevó a cabo un breve curso sobre la norma ISO 17025; sus aspectos más importantes y el procedimiento llevado por el laboratorio para recibir esta acreditación.

Entre los aspectos más importantes que se trataron en este curso están:

- Sistema de gestión

- Control de documentos
- Revisión de pedidos, ofertas y contratos
- Control de registros
- Auditorias
- Incertidumbre
- Desviación estándar

Figura 12. Laboratorio de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana



2.2 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

Actualmente el laboratorio de instrumentación cuenta con módulos para el entrenamiento en la medición de las variables primarias: nivel, flujo, temperatura y ahora presión. Dentro de las características más importantes del laboratorio y el espacio destinado al módulo de presión se tienen:

a. Espacio físico: El laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana tiene un área de 86 metros cuadrados aproximadamente, en los cuales se distribuyen los módulos de temperatura, nivel, flujo presión, elementos finales de control y tableros de instrumentos discretos.

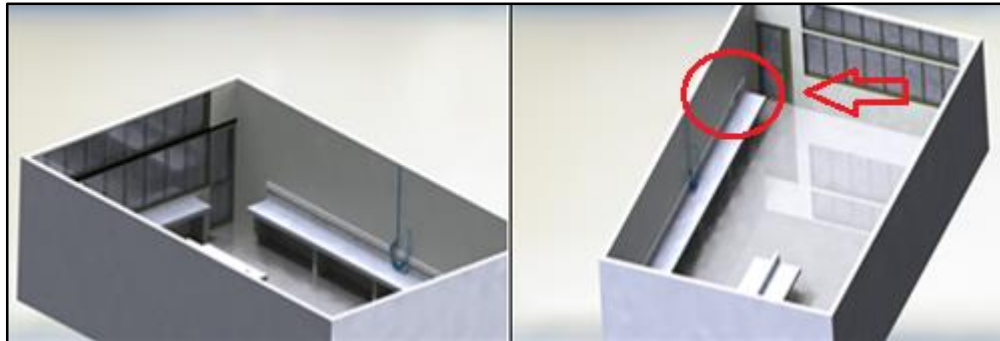
Cada módulo cuenta con herramientas especializadas para el correcto manejo y medición de la variable. Igualmente el laboratorio tiene disponibles servicios como agua, internet, conexión a la red eléctrica, suministro de aire comprimido, suministro de energía auxiliar y un sistema de aire acondicionado central. El laboratorio es administrado por el centro administrativo de laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana quien se encarga de la logística del mismo. En la **Figura 13** se presenta un diseño de este laboratorio.

b. Condiciones del Lugar: El laboratorio cuenta con lectura constante de temperatura y humedad relativa. Para poder tener un ambiente propicio para el trabajo y el control de estas variables se tienen dos instrumentos principales: un sensor de temperatura y humedad relativa y un reloj digital con un sensor de temperatura integrado. También se cuenta con un sistema de aire acondicionado integral controlado que mantiene una temperatura constante en todo el área del laboratorio.

c. Servicios Industriales: El módulo de presión cuenta con varios servicios industriales como: Servicio de internet, conexión a la red eléctrica, aire

acondicionado integral y energía auxiliar. A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos

Figura 13. Diseño en SolidWorks del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana ³⁶



Fuente: CORDOBA BENJUMEA FABIAN ANDRES y DUEÑAS MORENO JUAN CAMILO. Ingeniería conceptual del sistema de aseguramiento metrológico del módulo de temperatura del laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana.

- **Servicio de Agua**

Se cuenta con una zona de mantenimiento que tiene servicio de agua, este es suministrado mediante una grifo de ½ pulgada. El servicio es proporcionado por el acueducto que le suministra agua al edificio K de la Universidad Pontificia Bolivariana. En la **Figura 14** se presenta una imagen del grifo.

- **Servicio de energía**

Para conectarse a la red eléctrica se cuenta con 2 tomacorrientes de 110 V y uno de 220 V, los cuales suministran la energía suficiente para el funcionamiento del módulo.

³⁶ CORDOBA BENJUMEA FABIA ANDRES Y MORENO DUEÑAS JUAN CAMILO: Ingeniería conceptual del sistema de aseguramiento metrológico del módulo de temperatura del laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga, 2015, 341h. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Electrónica. Escuela de Ingeniería

En la **Figura 15** se muestran los toma corrientes disponibles.

Figura 14. Suministro de agua para el laboratorio



Figura 15. Toma corrientes



- **Servicio de Aire Comprimido**

Para la manipulación de los instrumentos de presión el módulo cuenta con suministro constante de aire comprimido, este brinda una presión máxima de 200 psi. La conexión al módulo se realiza mediante un regulador de presión, una llave de paso y una manguera de PFA de ¼ de pulgada.

En la **Figura 16** se muestra una imagen del regulador.

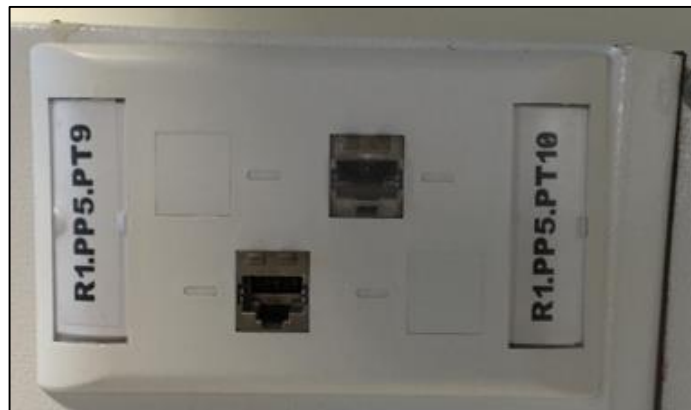
Figura 16. Regulador y conexión de aire comprimido



- **Servicio de Internet**

El módulo cuenta con una conexión a internet LAN que soporta velocidades de hasta 20 Mbps y una conexión inalámbrica de 25 Mbps. En la **Figura 17** se muestra el conector Ethernet para internet

Figura 17. Conexión a internet



- **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. En la **Figura 18** se presentan los toma corrientes de energía auxiliar.

Figura 18. Toma corrientes de energía auxiliar



- **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. En la **Figura 19** se presenta una imagen de este sistema.

- **Sistema de Iluminación**

El laboratorio cuenta con 9 módulos de lámparas fluorescentes para poder iluminar adecuadamente cada área de trabajo. En la **Figura 20** se muestra una imagen de estas luminarias.

Figura 19. Sistema de aire acondicionado



Figura 20. Sistema de iluminación del módulo



- **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.

2.3 REVISIÓN DE LA INGENIERÍA DE DETALLE

2.3.1 Aspectos Mecánicos

a. Manifold del Transmisor de Presión Relativa: Las válvulas manifold están diseñadas para la regulación y gestión de procesos de instrumentación y control. Entre las funciones de las válvulas manifold están: aislamiento, igualación, desagüe y venteo de la presión del proceso.³⁷

Las válvulas manifold de dos vías están diseñadas para trabajar con presión estática y aplicaciones de nivel de líquidos, mientras que las de tres vías están construidas para aplicaciones que implican presiones diferenciales.³⁸

A continuación se presentan los beneficios de la implementación de válvulas manifold en cualquier proceso:

- Ahorro en costos y materiales; ya que se eliminan los métodos convencionales de conexión de instrumentos.³⁹

³⁷ PIONEER ENTERPRISE. Manifold Valves [en línea] <<http://www.instrumentation-fittings.com/manifolds-valves.html>> [citado en 26 de agosto de 2015]

³⁸ SWAGELOK, Instrument Manifolds [en línea] <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/En/MS-01-178.pdf>> [citado en 26 de agosto de 2015]

³⁹ ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS. Manifolds and Accessories [en línea] <http://valves.pentair.com/valves//resources/AGIMC-0344-US_Pressure_Manifolds-EN.pdf> [citado en 26 de agosto de 2015]

- El espacio requerido para la operación e instalación de los manifolds es mínimo.⁴⁰
- Se reduce el riesgo de fugas ya que los manifolds tienen pocas partes para montar.⁴⁰
- Mediante el uso de las válvulas manifold se facilita la reparación, servicio y calibración de sensores, debido a que el instrumento se puede remover sin tener que desconectar la tubería del proceso.⁴⁰
- Cuando se está implementando una planta o proceso se pueden instalar los manifolds sin presencia de los instrumentos, haciendo que el proceso de construcción de la planta sea más rápido.⁴⁰

En la **Figura 21** se presenta el diagrama de un manifold de dos vías y en la **Figura 22** se presenta su estructura interna.

Como se puede ver en las **Figuras 21 y 22**, el manifold de dos vías cuenta con dos válvulas; una para abrir o cerrar el paso del líquido o aire de proceso hacia el instrumento, y otra para realizar el venteo del fluido.

El manifold utilizado para el transmisor de presión relativa es un manifold Smar de dos vías, en la **Figura 23** se muestra este manifold junto con el transmisor.

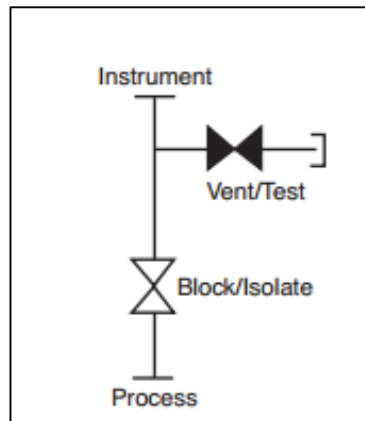
b. Manifold del Transmisor de Presión Diferencial: Para la correcta manipulación del transmisor de presión diferencial se instaló un manifold de tres vías. En la **Figura 24** se presenta el diagrama de este manifold y en la **Figura 25** su estructura interna.

Como se puede ver en las **Figuras 24 y 25** el manifold de tres vías es muy útil para trabajar con presiones diferenciales, ya que tiene dos entradas de proceso con su respectiva válvula. Adicionalmente cuenta con una válvula para igualar la presión

⁴⁰ PIONEER ENTERPRISE. Op. cit., p. 28.

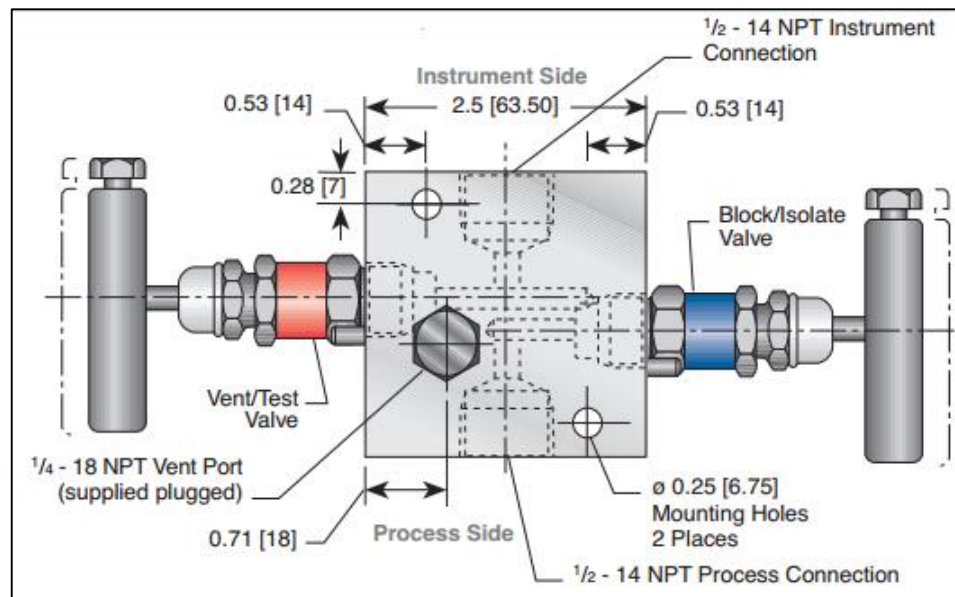
de estas dos entradas de proceso. En la **Figura 26** se presenta el manifold de tres vías utilizado con el transmisor de presión diferencial.

Figura 21. Diagrama de un manifold de dos vías.⁴¹



Fuente: ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS.
Manifolds and Accessories

Figura 22. Estructura interna de un manifold de dos vías.⁴¹



Fuente: ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS.
Manifolds and Accessories

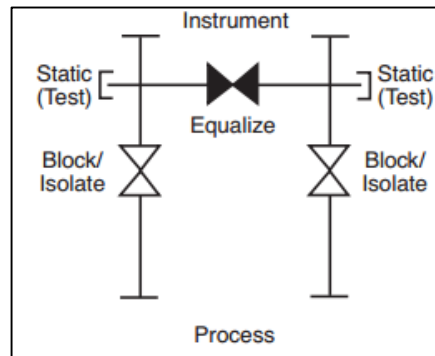
⁴¹ ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS. Op. cit., p. 28.

c. **Racores:** En la fase anterior de este proyecto se seleccionaron los equipos y accesorios a utilizar, dentro de esa selección se escogieron racores de ¼ de pulgada NPT de acero inoxidable de conexión rápida. En la **Figura 27** se muestran esos racores.

Figura 23. Manifold de dos vías Smar y transmisor de presión relativa



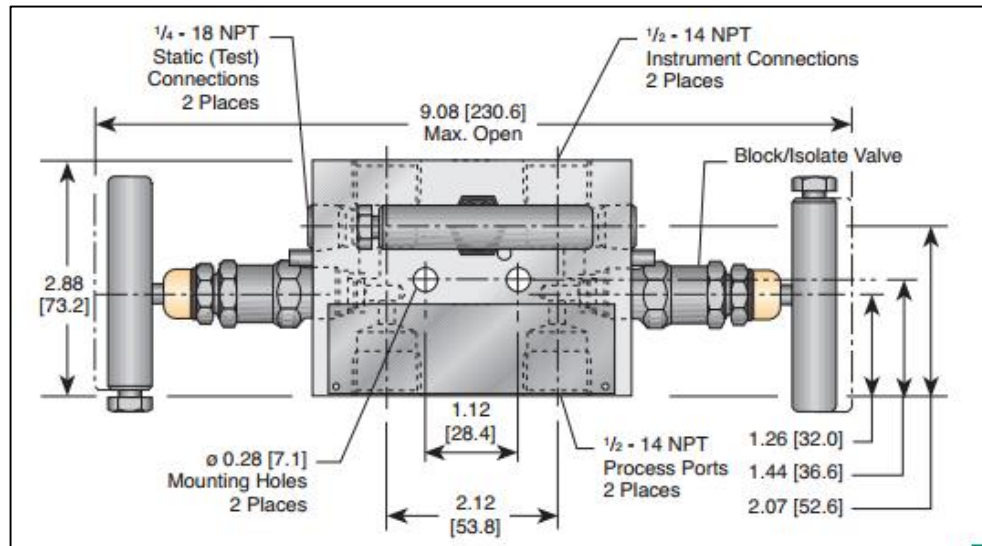
Figura 24. Diagrama de un manifold de tres vías. ⁴²



Fuente: ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS.
Manifolds and Accessories.

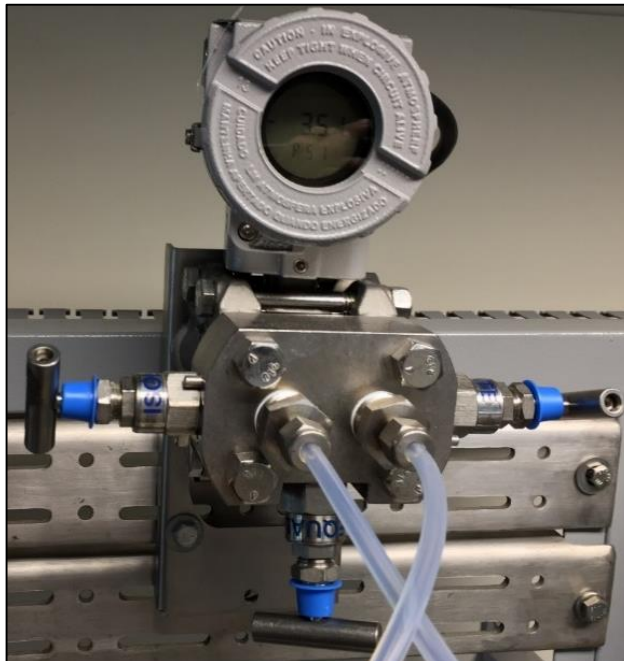
⁴² Ibid., p. 30.

Figura 25. Estructura interna de un manifold de 3 vías. ⁴³



Fuente: ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS. Manifolds and Accessories.

Figura 26. Manifold de 3 vías Smar y transmisor de presión diferencial



⁴³ Ibid., p. 31.

Figura 27. Racores de ¼ de pulgada NPT



Con este tipo de racores se detectaron varias fugas, debido a que el mecanismo con el cual hacen sello es un empaque ubicado en el escalón del mismo (véase **Figura 28**). Este empaque tiende a dañarse cuando el racor se enrosca en su respectiva hembra.

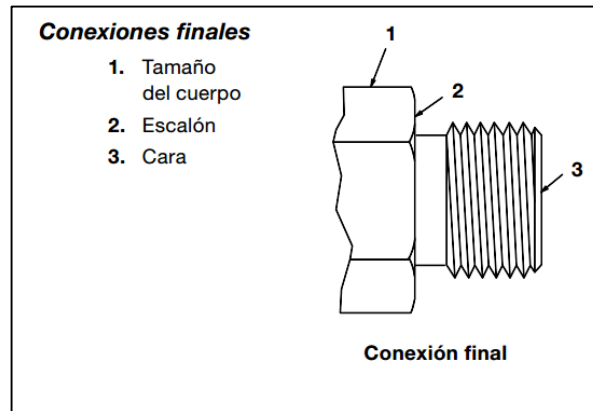
Otra fuga que se detectó fue al conectar y desconectar repetitivamente la manguera al racor, ya que este tipo de conexión es rápida y no garantiza la estanqueidad del sistema. Las flechas rojas de la **Figura 27** indican estos lugares de fugas.

En la visita técnica que se hizo al ICP se recomendó que se utilizara el sistema de férula y contra férula presente en los racores Swagelok.

De este modo se procedió a realizar una inspección de este sistema en la página de Swagelok Colombia y después de hacer una breve investigación de este tipo de racores se contactó con el asesor comercial para Santander y se acordó una visita al laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En esta visita se tuvo un pequeño taller en el cual se aprendió a utilizar e instalar el sistema de férula y contra férula de Swagelok.

Figura 28. Partes de una conexión final. ⁴⁴



Fuente: SWAGELOK. Roscas y Conexiones finales

El mecanismo de dos férulas funciona de la siguiente manera; la férula frontal crea el sello haciendo presión contra el cuerpo del racor y de la misma manera con el diámetro externo de la tubería.

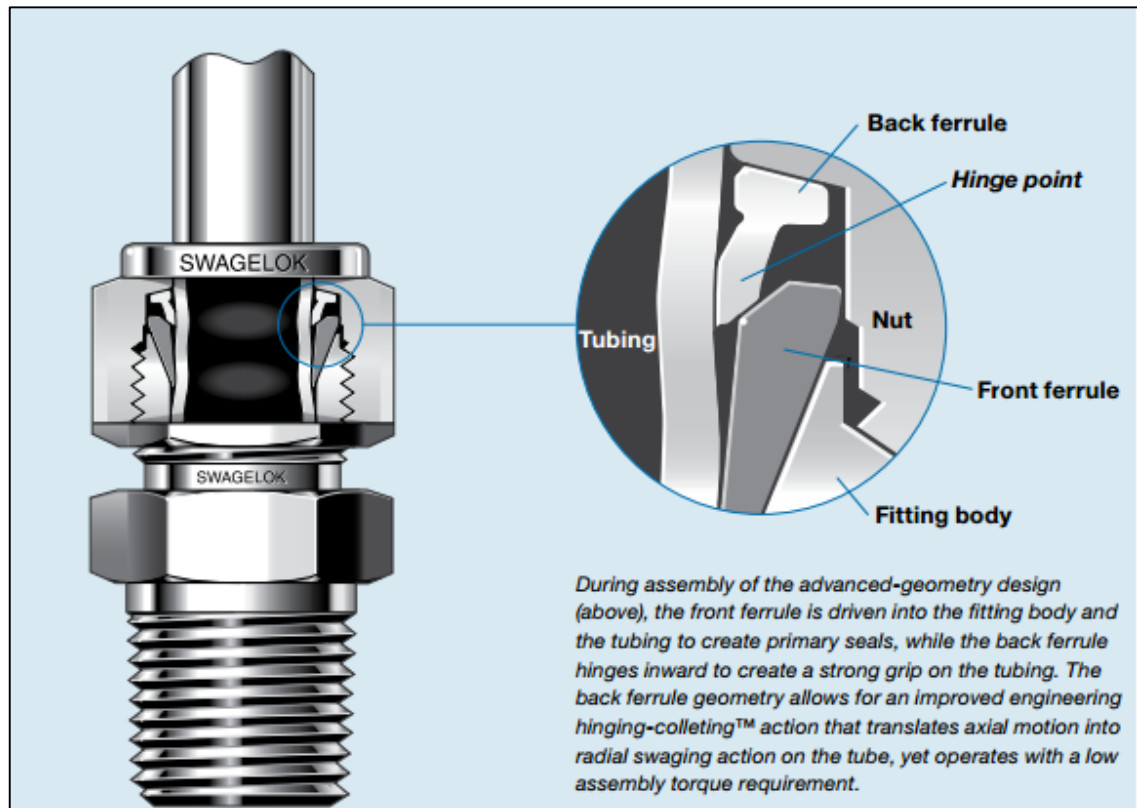
Cuando la tuerca del racor es instalada la férula trasera hace presión axialmente sobre la delantera ayudando a que esta realice correctamente el sello y por otra parte asegura la tubería al racor. En la **Figura 29** se presenta un esquema de este sistema.

En la **Figura 30** se presenta una imagen de un racor con Swagelok con su respectiva férula y contra férula.

d. Unión Te: De la misma forma como se escogieron los racores en la fase anterior del proyecto, se seleccionaron las uniones tipo Te a utilizar. En la **Figura 31** se presenta una unión de estas.

⁴⁴ SWAGELOK. Roscas y Conexiones finales. [en línea]. < <https://www.swagelok.com.mx/downloads/webcatalogs/es/ms-13-77.pdf> > [citado en 14 de agosto de 2015]

Figura 29. Esquema del sistema de férula y contra férula de los racores Swagelok⁴⁵



Fuente: SWAGELOK. Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings

Figura 30. Racor Swagelok de ¼ de pulgada NPT



⁴⁵ SWAGELOK. Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings [en línea]
<<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-01-140.pdf>> [citado en 15 de agosto de 2015]

Figura 31. Unión tipo Te



Estas uniones fueron hechas por un proveedor local y el material de construcción es acero inoxidable, igualmente cuentan con cuatro orificios para fijarlas al módulo de presión.

Para la conexión al circuito de presión tienen tres roscas hembras de $\frac{1}{4}$ de pulgada NPT.

El problema que se tuvo con esta unión fue que la calidad de la rosca no era muy buena, por ende cuando se instalaba el racor no se realizaba una conexión hermética y se presentaban fugas.

Adicional a esto estéticamente no es la mejor elección ya que para poder instalar un manómetro en estas uniones se necesitaba un adaptador el cual estaba hecho en cobre. En la **Figura 32** se presenta una imagen de un manómetro instalado con este tipo de unión.

Figura 32. Manómetro con unión Te



Debido a estos problemas se decidió utilizar uniones Te de Swagelok, las cuales son de alta calidad y totalmente compatibles con los racores Swagelok previamente seleccionados.

Después de haber seleccionado las uniones Te de Swagelok se pudo observar una gran diferencia tanto en el aspecto estético como funcional, ya que esta Te viene por un lado con una rosca hembra de $\frac{1}{4}$ de pulgada NPT para poder instalar los manómetros y por los otros dos lados viene con las conexiones Swagelok del sistema férula y contra férula que aseguran la estanqueidad en el sistema. En la **Figura 33** se presenta una unión Te Swagelok con un manómetro.

Igualmente para realizar las uniones en las cuales no se necesitaba poner un manómetro sino solo la manguera, se presentó el mismo problema de fugas, debido a esto se seleccionaron uniones Te como las que se muestra en la **Figura 34**.

Figura 33. Unión Te Swagelok con manómetro



Con estas uniones se pudo solucionar el problema de fugas que se tenía, pues el sistema de conexión de férula y contra férula de Swagelok asegura la estanqueidad del circuito de presión.

Figura 34. Unión Te Swagelok



e. Bomba manual FLUKE: El suministro de aire a presión del laboratorio consiste en un compresor que brinda hasta 200 psi, por esta razón se vio la necesidad de adquirir un accesorio adicional ya que los manómetros presentes en el módulo tienen intervalos de hasta 300 psi.

Para esto se seleccionó una bomba manual FLUKE 700PTP1. El criterio de selección para esta bomba se basó en su robustez y calidad de fabricación e igualmente su capacidad para generar presiones de hasta 600 psi, la cual es suficiente para lo que se necesita en el proyecto. En la **Figura 35** se presenta una imagen de este instrumento.

f. Módulo de presión FLUKE: En la fase anterior de este proyecto se contaba con un módulo de presión FLUKE de 100 psi, pero con la inclusión de la bomba manual 700PTP1 se necesitó de un instrumento adicional para realizar las medidas de presión.

Figura 35. Bomba manual FLUKE 700PTP1



Para esto se escogió el módulo de presión FLUKE 700P27 que mide hasta 300 psi.

Cabe resaltar que este módulo es compatible con el calibrador de procesos FLUKE 726 que se tiene en el módulo de presión.

Este instrumento junto con el módulo de presión FLUKE de 100 psi son los instrumentos patrones de medida ya que cuentan con certificado de calibración FLUKE.

En la **Figura 36** se puede ver este módulo conectado al calibrador de procesos FLUKE 726.

Figura 36. Módulo de presión FLUKE 700p27



g. Protector de venteo: Los protectores de venteo se utilizan para proteger las terminaciones de instrumentos, tuberías o salidas que están expuestas a la atmosfera. Estos accesorios resguardan al usuario de objetos despedidos de la línea de proceso e impide la descarga repentina de la presión almacenada en el circuito.

El protector de venteo que se tenía estaba construido en cobre y el ajuste que hacía con las roscas de las válvulas Swagelok no era el mejor. En la **Figura 37** se muestra este protector.

Por este motivo se decidió cambiar a un protector de venteo Swagelok el cual es construido en acero inoxidable y el ajuste con las roscas de las válvulas es el adecuado. En la **Figura 38** se muestra este protector.

Figura 37. Protector de venteo



Figura 38. Protector de venteo Swagelok



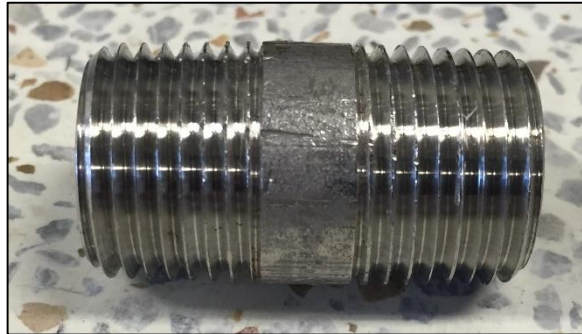
h. Uniones: Las uniones son utilizadas para conectar instrumentos y partes del circuito de presión, a continuación se presentan las uniones utilizadas en el módulo y sus respectivos cambios:

- **Unión para Conectar el Transmisor Smar LD-291**

Para poder conectar el transmisor de presión relativa Smar LD-291 a su correspondiente manifold y al circuito de presión se requiere de una unión NPT de ½ pulgada.

La unión que se tenía anteriormente no era de la mejor calidad; su rosca no encajaba adecuadamente en el transmisor y en el manifold, esto hacia que el sello no fuera adecuado y por ende se presentaran fugas en esta parte del circuito. En la **Figura 39** se presenta esta unión.

Figura 39. Unión de ½ pulgada



Por este motivo se decidió cambiar esta unión por una Swagelok, la cual presenta excelente calidad de fabricación y su acople con el transmisor y el manifold es excelente. De esta manera se pudo eliminar la fuga de aire que existía en esta parte del circuito. En la **Figura 40** se presenta la unión Swagelok

Figura 40. Unión de ½ pulgada NPT Swagelok ⁴⁶



Fuente: Swagelok. Products, SS-8-CN

⁴⁶ SWAGelok. Products ss-8-cn [en línea] < <http://www.swagelok.com/search-results/search-results.aspx?q=ss-8cn> [citado en 16 de agosto de 2015]

- **Unión para Conectar los Módulos de Presión FLUKE**

Los módulos de presión FLUKE utilizados en el proyecto cuentan con una conexión de ¼ de pulgada NPT macho. En la **Figura 41** se presenta la unión que se estaba utilizando para conectar estos módulos.

Figura 41. Unión de ¼ de pulgada NPT



Como se puede ver en la **Figura 41** el material de construcción de estas uniones es hierro y la calidad de la rosca no es de las mejores, por ende al roscar los módulos de presión se presentaban fugas en la conexión.

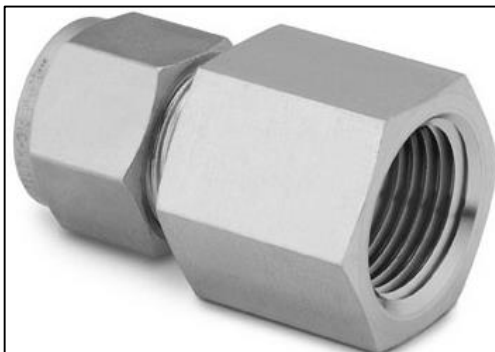
Por este motivo se decidió cambiar estas uniones por unas Swagelok que cuentan en un extremo con una conexión de ¼ de pulgada NPT hembra, y por el otro lado tienen una conexión para poder acoplar la manguera mediante el sistema de férula y contra férula de Swagelok. En la **Figura 42** se muestra este accesorio.

2.3.2 Aspectos Electrónicos

a. Lazo de Control 4 a 20mA

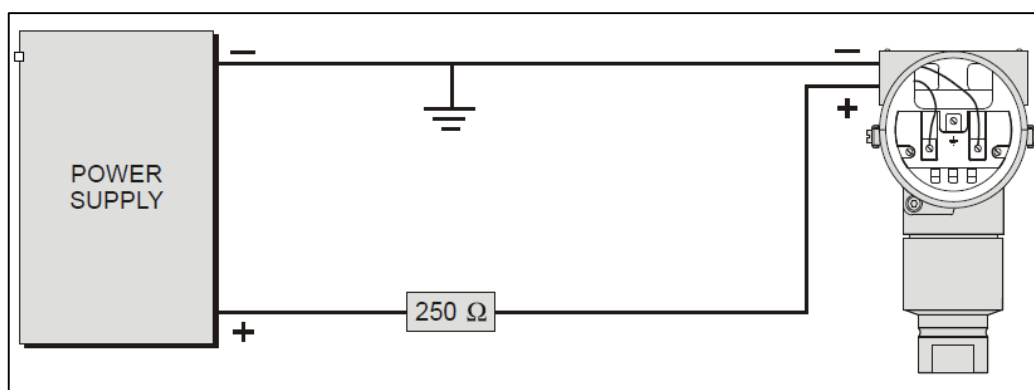
Para poder conectar los transmisores Smar se requirió de una conexión 4 a 20 mA. En la **Figura 43** se presenta esta conexión.

Figura 42. Conector hembra de ¼ de pulgada OD por ¼ de pulgada NPT. ⁴⁷



Fuente: Swagelok. Products, SS-400-7-4

Figura 43. Conexión del transmisor Smar LD291. ⁴⁸



Fuente: Smar LD291 INTELLIGENT PRESSURE TRANSMITTER

b. Conexión 4 a 20mA + HART

Para comunicarse con el transmisor, configurarlo y cambiar sus diferentes parámetros mediante el computador se requiere de un configurador HART conectado a los terminales positivo y negativo de este. En la **figura 44** se presenta esta conexión.

⁴⁷ SWAGELOK. Products ss-400-7-4 [en línea]

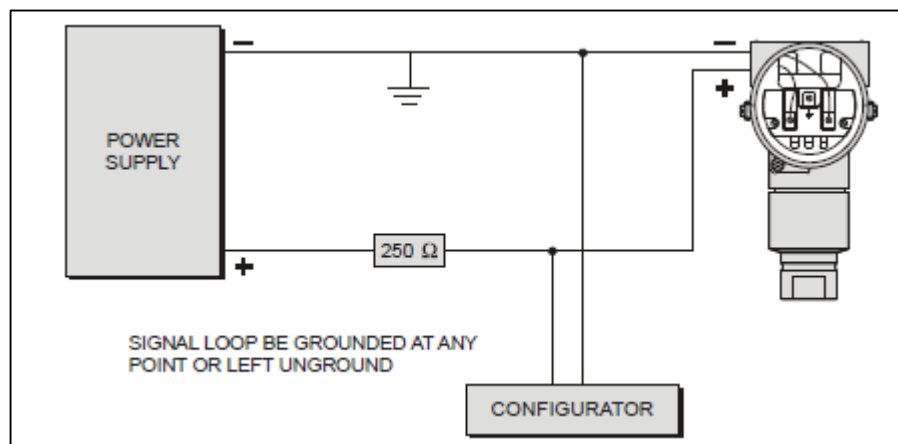
<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=SS-400-7-4&item=> [citado en 16 de agosto de 2015]

⁴⁸ SMAR. Op. cit., p. 9.

Como se puede ver en la **Figura 44**, se necesita de un configurador HART y una resistencia para poder conectar el transmisor mediante el protocolo HART.

Este tipo de conexión es muy importante ya que mediante el protocolo de comunicación HART se pueden realizar ajustes en el transmisor como: cambiar unidades, detectar fallas, revisar la conexión 4 a 20 mA y hasta monitorear la corriente y presión del circuito.

Figura 44. Conexión HART del transmisor Smar LD291. ⁴⁹



Fuente: Smar LD291 INTELLIGENT PRESSURE TRANSMITTER

c. Software DDCON100 para Windows 7

Para comunicarse con los transmisores y visualizar gráficamente la presión y corriente 4 a 20 mA al igual que para configurar los diferentes parámetros de cada uno se utiliza el Software DDCON100 el cual es la interfaz gráfica para realizar la comunicación por protocolo HART.

⁴⁹ Ibid., p. 45.

Anteriormente para utilizar este software se necesitaba iniciar una máquina virtual de Windows XP lo que hacía que la respuesta del programa fuera lenta y en muchos casos se cerraba inesperadamente. Adicionalmente para que el software reconociera e iniciara la comunicación HART con los transmisores se requería cierto tiempo ya que era necesario conectar y desconectar varias veces la interfaz USB DDCON100 al computador y reiniciar la máquina virtual.

Por estas razones se decidió adquirir la actualización del DDCON100 para Windows 7 la cual no necesita de máquina virtual y el proceso de conexión vía HART con los transmisores es inmediato.

2.4 MONTAJE DEL MÓDULO DE PRESIÓN

a. Estructura

El marco estructural del módulo es en acero y va anclado en la parte superior a la pared por cuatro tornillos de acero inoxidable y en la parte inferior por dos tornillos del mismo material. En la **Figura 45** se puede ver este marco.

Para que el módulo fuera flexible en cuanto al posicionamiento de instrumentos se realizaron unas barras de sujeción de dispositivos en acero inoxidable, con orificios especialmente pensados para esta tarea. En la **figura 46** se presentan estas barras

Como se puede ver en la **Figura 46** esta barra cuenta con orificios especialmente diseñados para que la ubicación de instrumentos ya sea manómetros, reguladores o transmisores se puedan cambiar en cualquier momento rápida y fácilmente.

Figura 45. Marco estructural del módulo de presión

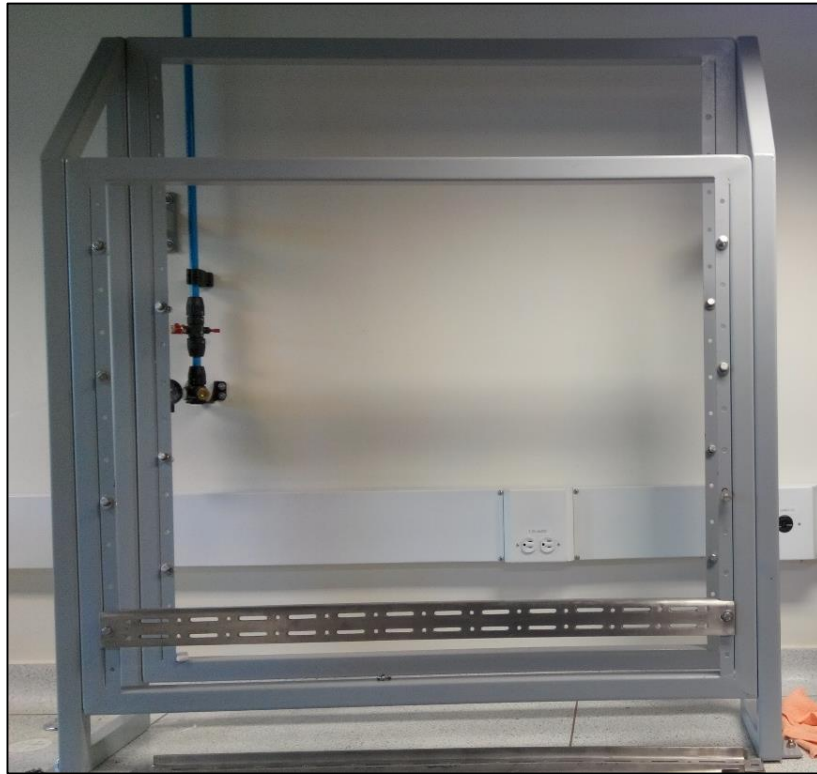


Figura 46. Barra de sujeción de instrumentos



b. Montaje de instrumentos

Después de la etapa de revisión de la ingeniería de detalle en la cual se definieron aspectos como racores y uniones a utilizar, se procedió a instalar los instrumentos en el marco del módulo.

Lo primero que se hizo fue fijar los manómetros y los reguladores en sus respectivas posiciones.

A continuación se procedió a interconectar estos elementos y finalmente se instalaron los transmisores y los módulos de presión FLUKE. En las **Figuras 47 y 48** se presentan las imágenes de este proceso.

Figura 47. Manómetros, válvulas y reguladores instalados en el marco del módulo



Con el fin de hacer que el montaje de los reguladores y las válvulas sea una tarea fácil, se mandaron hacer los accesorios presentados en la **Figura 49**.

Del mismo modo para poder instalar las Te Swagelok se mandaron hacer otros accesorios. En la **Figura 50** se muestra estos accesorios.

Figura 48. Módulo con todos los instrumentos conectados



Figura 49. Accesorios para fijar los reguladores y válvulas



Figura 50. Accesorios para fijar las Te Swagelok a la estructura del modulo



c. Gabinete de adquisición de datos

Para poder visualizar la información enviada por los transmisores y monitorear la señal 4 a 20 mA de cada uno se implementó un sistema de adquisición de datos que consta de un chasis de NATIONAL INSTRUMENTS NI cDAQ-9174 de 4 ranuras y un módulo de entrada de corriente analógica de ocho canales y 16 bits de resolución.

Este gabinete está fijado a la pared mediante cuatro tornillos de acero inoxidable y cuenta con un orificio en la parte lateral para pasar los cables de los transmisores, y en la parte inferior cuenta con dos orificios; para pasar los cables de energía y los cables que van conectados a los puertos USB del computador.

Estos equipos van montados en un gabinete de adquisición de datos Rycltel como el que se muestra en la **Figura 51**.

Cabe resaltar que antes de implementar el cableado del sistema de adquisición de datos se realizó un diseño en la herramienta de simulación AutoCAD, esto con el fin de tener un registro de cómo está distribuido todo el sistema, y sea más fácil ejecutar alguna modificación. En la **Figura 52** se presenta este diseño.

Figura 51. Gabinete de adquisición de datos



Este diseño se organizó por las capas mostradas en la **Figura 53**.

- **Protecciones para los Diferentes Dispositivos**

Como medida de seguridad se instaló una parada de emergencia, esta interrumpe el paso de energía de la línea que alimenta el interruptor automático general del circuito. En la **Figura 54** se presenta una imagen de la parada de emergencia.

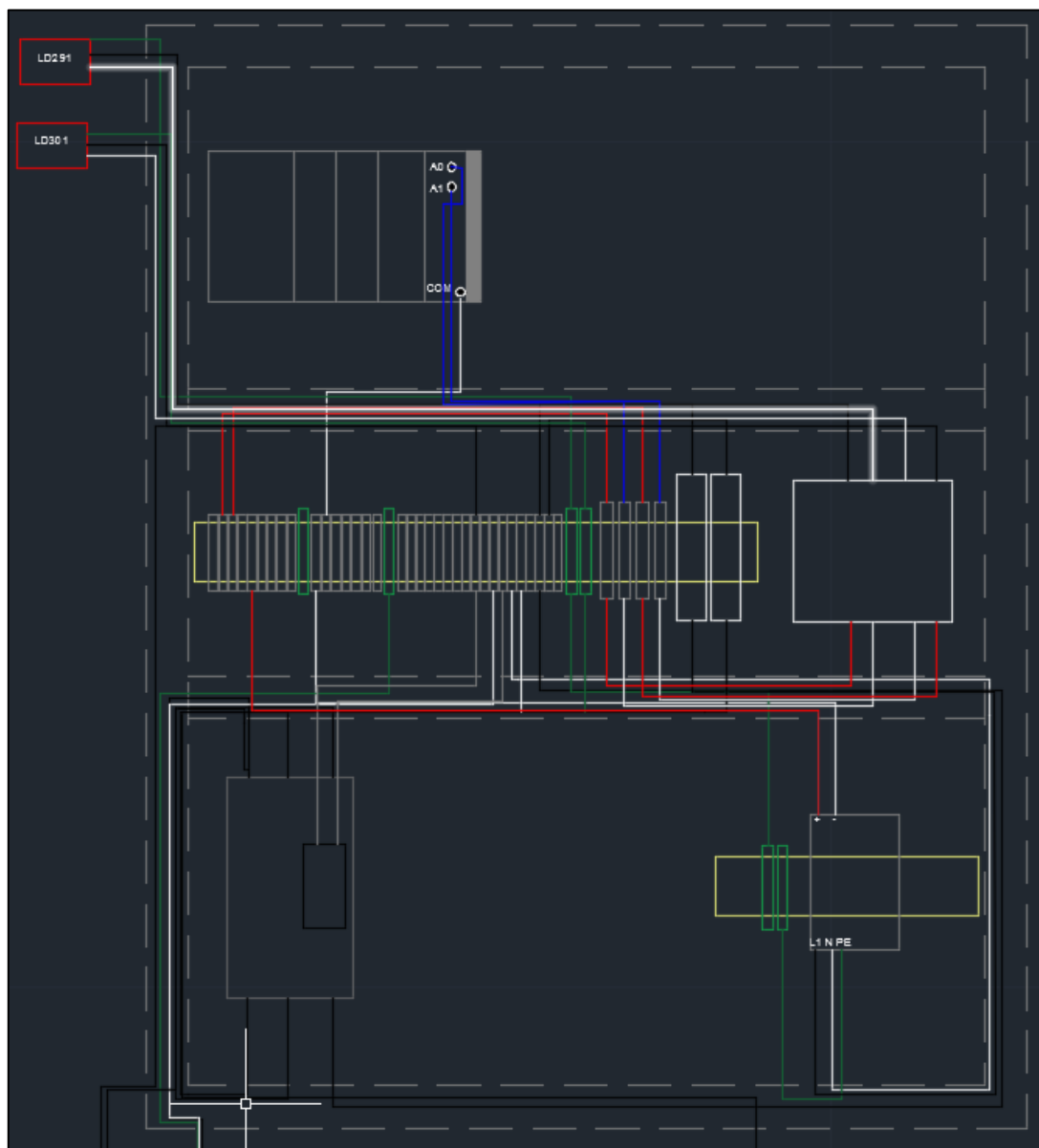
Como protección general se instaló un Interruptor Schneider de 15 A como el que se muestra en la **Figura 55**.

Para proteger el chasis NATIONAL INSTRUMENTS NI cDAQ-9174 se instaló un interruptor de 1 A como el que se muestra en la **Figura 56**.

Para la fuente de 24 V utilizada para alimentar los transmisores se instaló un Interruptor de 2 A como el de la **Figura 57**.

Después de haber definido las protecciones a utilizar y de haber realizado el diseño en AutoCAD del cableado del sistema de adquisición de datos se procedió a implementarlo.

Figura 52. Diseño en AutoCAD del cableado del sistema de adquisición de datos



- **Cableado**

En las **Figuras 58 y 59** se muestran las etapas de este proceso.

Como se puede ver en la **Figura 44** para la conexión del protocolo HART se requiere de una resistencia de mínimo 250 Ohm.

Figura 56. Protección para el chasis NI cDAQ-9174



Figura 57. Protección para la fuente de 24V



Figura 58. Instalación de canales, rieles e instrumentos en el doble fondo del gabinete del sistema de adquisición de datos



Figura 59. Cableado del Interruptor, fuente de 24 V y chasis NI cDAQ-9174



Por razones didácticas se decidió que esta resistencia se ubicara en un lugar visible al operador, por esto se implementó una caja en acrílico con orificios para poder conectar los terminales del configurador HART y por otro lado para poder observar la trama HART en un osciloscopio. En la **Figura 60** se muestra esta caja.

Figura 60. Caja para conectar los terminales del configurador HART y osciloscopio



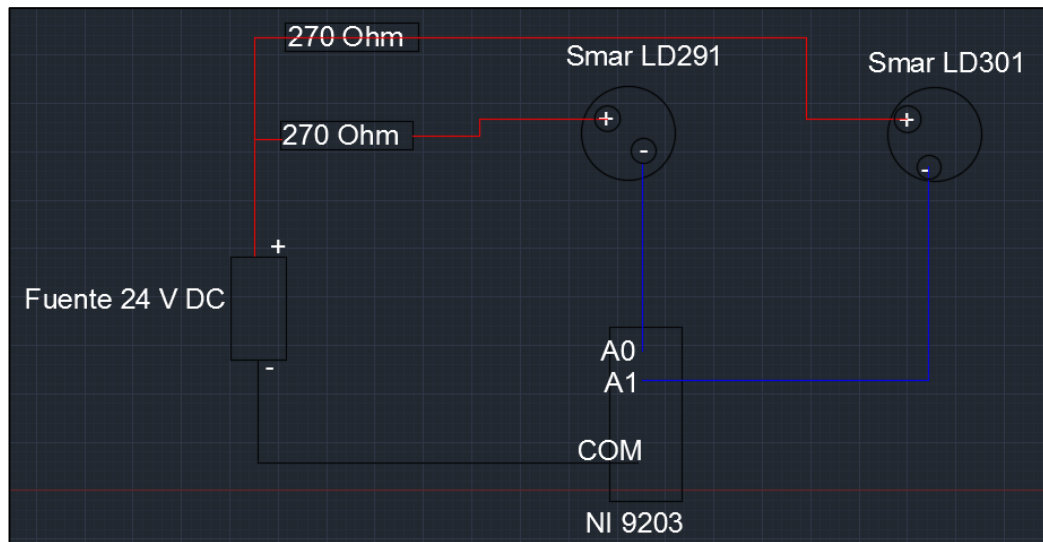
Para poder visualizar la corriente 4 a 20 mA de cada transmisor se utilizó una tarjeta de entrada de corriente NATIONAL INSTRUMENTS de 16 bits. En la **Figura 61** se muestra la forma de conexión.

- **HMI**

Para poder visualizar la corriente de cada transmisor se utilizó el software LabVIEW versión 2011 del cual la Universidad Pontificia Bolivariana tiene la licencia correspondiente.

En las **Figuras 62 y 63** se muestra el diagrama de bloques y el panel frontal implementados en LabView

Figura 61. Forma de conexión para la adquisición de la corriente 4 a 20mA de los transmisores



Como se puede ver en la **Figura 63**, la tarjeta NI9203 se configuro mediante el bloque DAQ Assistant; aquí se seleccionaron las entradas análogas a utilizar (AI0 y AI1).

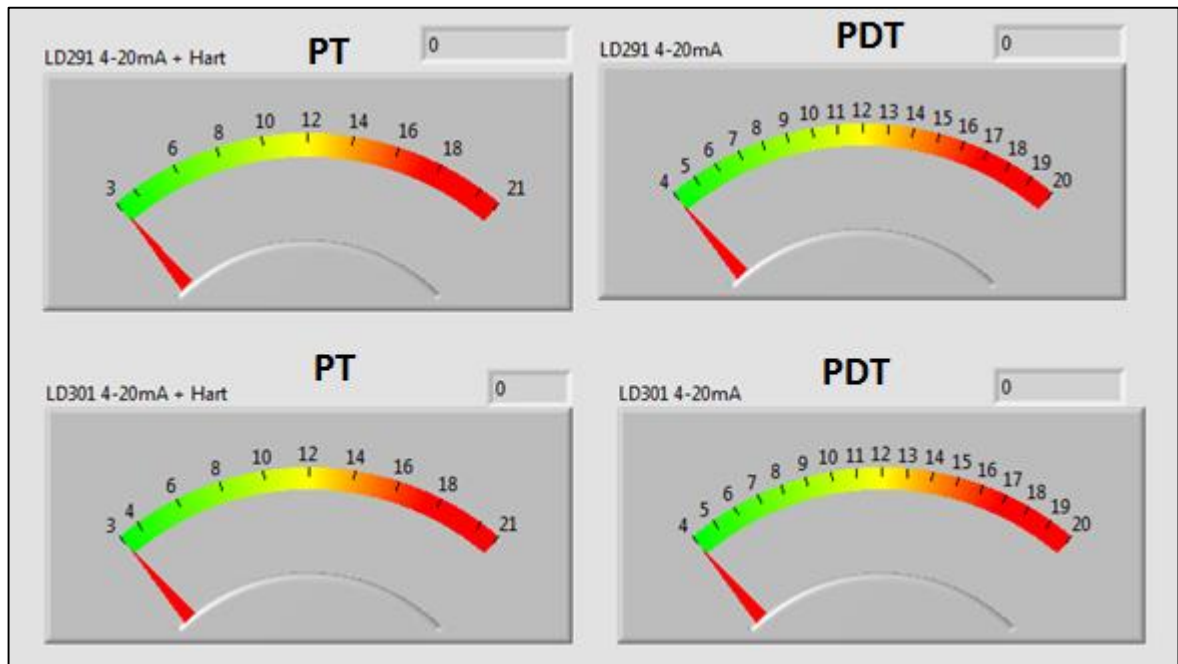
Cuando se conecta el configurador HART a cualquier transmisor se introduce ruido a la señal 4 a 20 mA, Para poder visualizar la corriente como un valor fijo y estable se agregó el bloque de la **Figura 64**.

Este bloque adquiere una trama larga de la información que le suministra el bloque DAQ Assistant y la comprime en porciones más pequeñas, de este modo el ruido que percibe por la comunicación HART es eliminado.

En la **Figura 62** se puede observar cuatro indicadores, dos de estos equivalen a la señal proveniente del bloque DAQ Assistant y las otras dos de la señal comprimida.

Esto se realizó de esta manera con fines didácticos, ya que de este modo el operario del módulo puede ver por un lado la señal 4 a 20 mA y por otro lado la distorsión que la tarjeta NI 9203 capta cuando se establece la comunicación por medio del protocolo HART con los transmisores.

Figura 62. Panel frontal en LabView



2.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y SEGURIDAD

a. Prueba de Estanqueidad

Las pruebas de estanqueidad tienen como finalidad asegurar la ausencia de fugas de cualquier sistema en el que intervengan fluidos a presiones iguales o distintas a la atmosférica.⁵⁰

Para realizar estas pruebas se utilizó el líquido detector de fugas de Swagelok, este es un líquido no corrosivo y tiene como característica principal que las burbujas se

⁵⁰ TUV NORD CUALICONTROL. Pruebas de estanqueidad en tuberías [en línea] <<http://www.tuv-nord.com/es/asistencia-tecnica-industrial/pruebas-de-estanqueidad-527.htm>> [citado en 21 de agosto de 2015]

pueden producir en presencia de fugas muy pequeñas. En la **Figura 65** se muestra una imagen de este líquido.

Figura 63. Diagrama de bloques

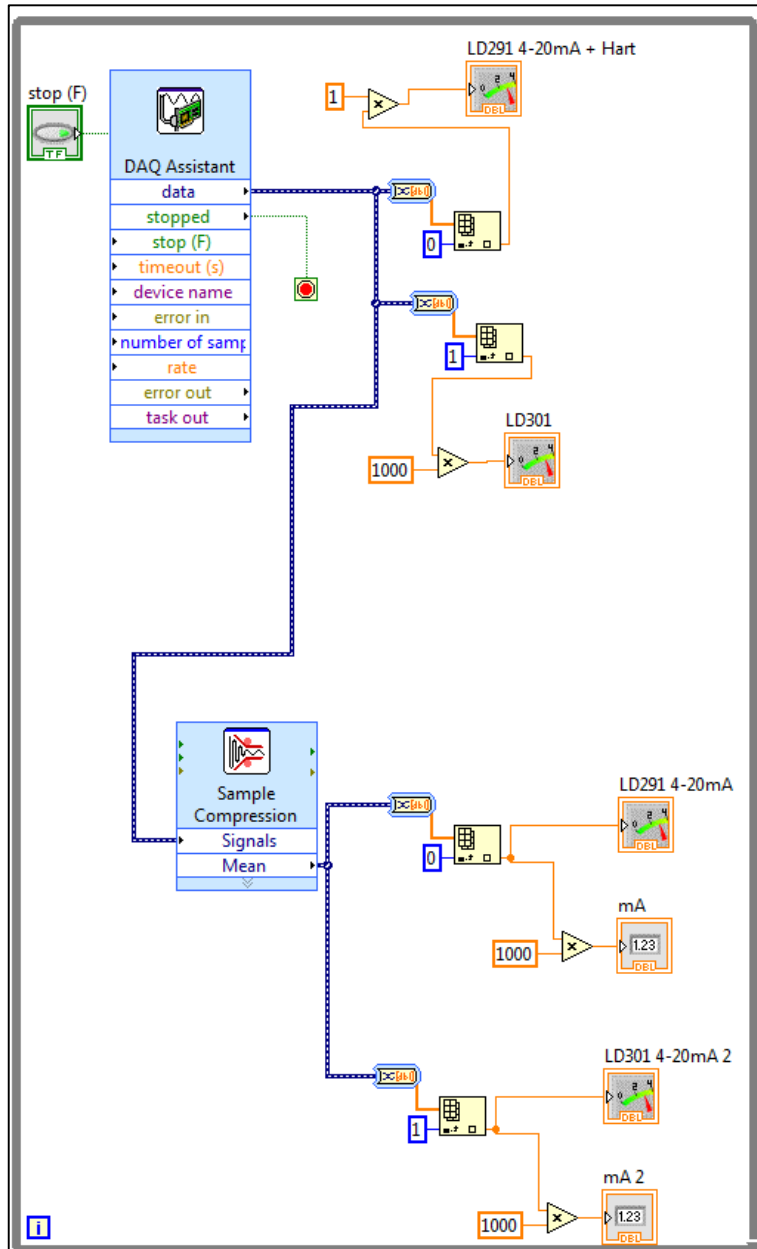
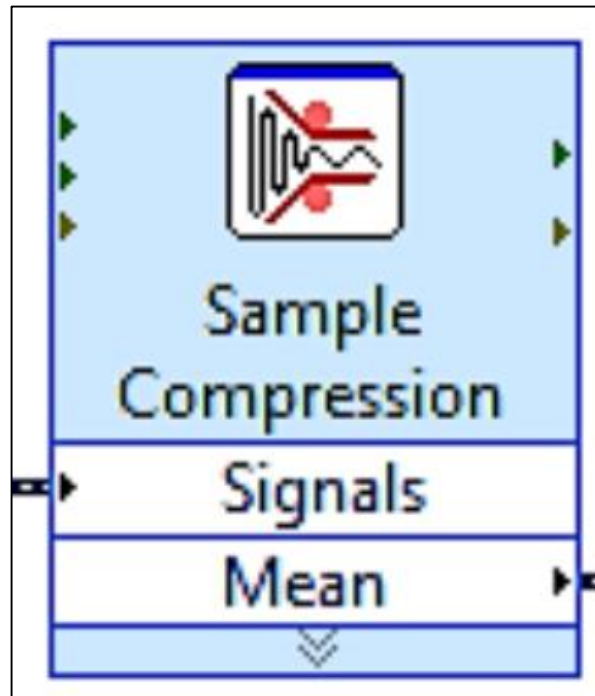


Figura 64. Bloque Sample Compression



Para esta prueba se llevaron todos los manómetros hasta la mitad de su intervalo y se cerraron las válvulas del regulador y la bomba manual del módulo.

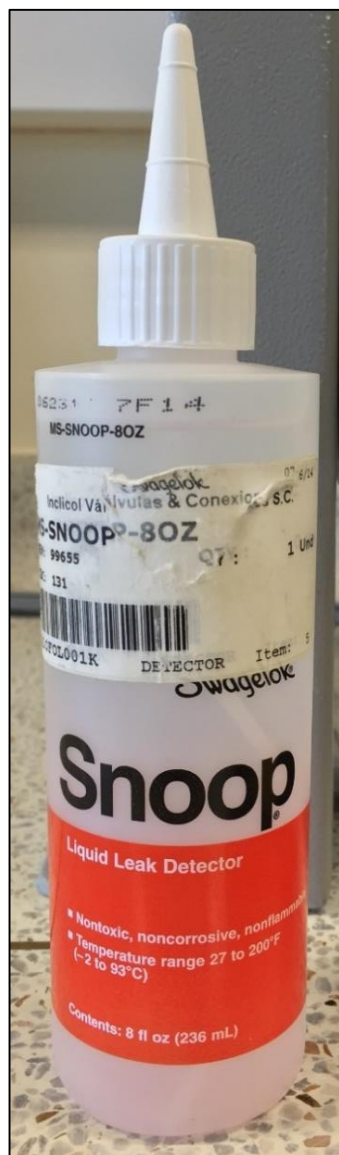
Después de 24 horas se pudo ver que las agujas indicadoras de los manómetros seguían señalando la misma presión, por ende se puede evidenciar que los cambios de racores, uniones y Te Swagelok ayudaron a que el sistema no tuviese fugas.

b. Lazo 4 a 20mA y Protocolo HART

En esta parte se comprobó el funcionamiento del lazo 4 a 20 mA de los dos transmisores y la comunicación HART.

Para comprobar el funcionamiento del lazo 4 a 20 mA se fue aumentando y disminuyendo la presión del circuito y se comparó la corriente indicada en cada

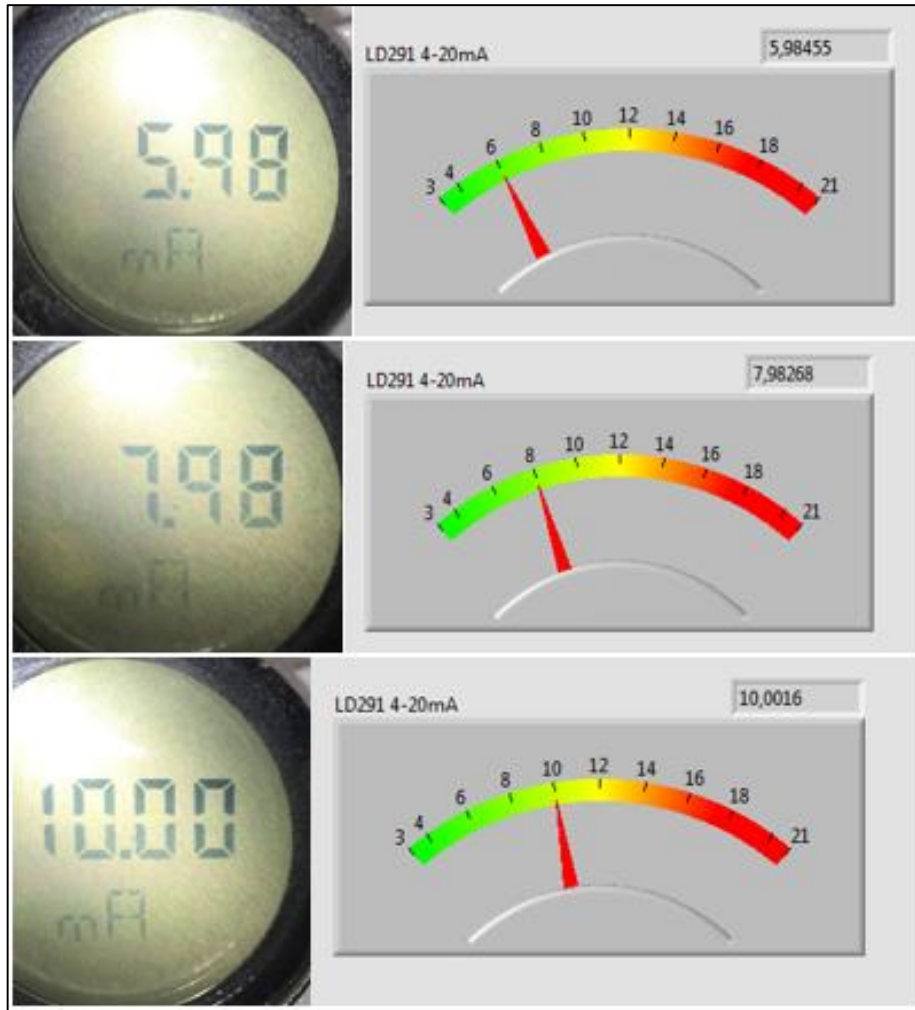
Figura 65. Líquido detector de fugas



transmisor junto con la que indicaba el programa realizado en LabVIEW y módulos de presión FLUKE. En las **Figuras 66 y 67** se muestra esta comparación.

Como se puede ver en las **Figuras 66 y 67** la corriente indicada por los transmisores coincidió con la de LabVIEW, con lo cual se puede evidenciar que el lazo 4 a 20 mA y el sistema de adquisición de datos se implementó de forma adecuada.

Figura 66. Corriente indicada por el transmisor de presión relativa y por el programa realizado en LabVIEW



Para comprobar el funcionamiento de la comunicación HART con los dos transmisores se realizó el mismo procedimiento anterior, y se visualizó en el software DDCON100 la presión y corriente que indicaban los transmisores. En las **Figuras 68 y 69** se presentan las imágenes generadas por el software DDCON100

Como se puede ver en las **Figuras 68 y 69** la comunicación HART con los transmisores se realizó exitosamente.

c. Verificación de Instrumentos

- **Transmisor Indicador de Presión Smar LD-291**

Para verificar que este instrumento funcionara correctamente se realizó un ascenso de presión de 0 a 300 psi y un descenso de 300 a 0 psi, durante todo el proceso se observó la corriente y presión que este instrumento indicó y adicionalmente se comprobó que la comunicación HART funcionara adecuadamente. En la **Figura 70** se presenta una imagen generada por el software DDCON100 en la cual se evidencia esta verificación. En esta figura se puede ver que la presión en el transmisor de presión relativa llego hasta 300 psi y durante este proceso se estuvo monitoreando el funcionamiento del transmisor, la comunicación HART y la presencia de alguna fuga.

Figura 67. Corriente indicada por el transmisor de presión diferencial y por el programa realizado en LabVIEW

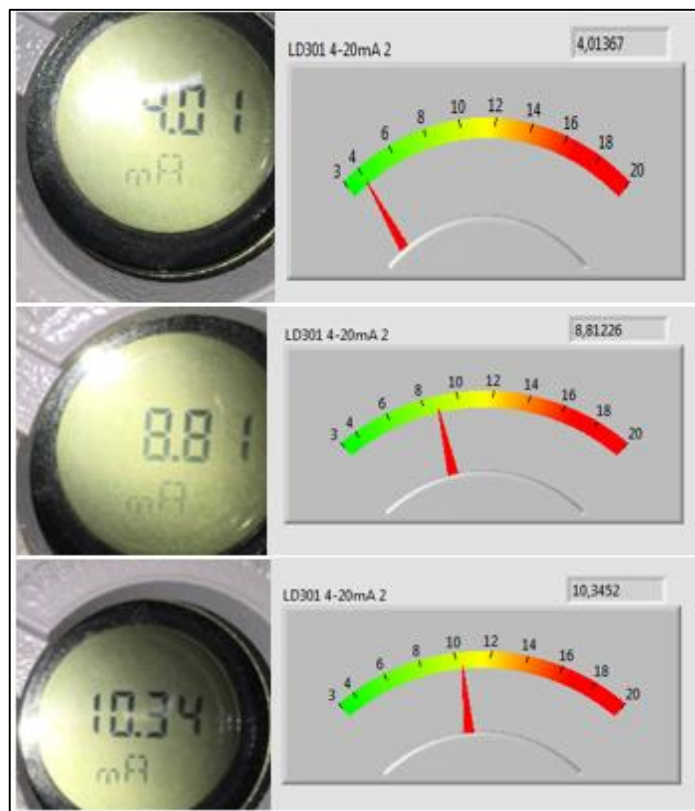


Figura 68. Presión y corriente Indicadas por el software DDCON100 para el transmisor de presión relativa



Terminada esta prueba se pudo evidenciar que el instrumento funcionó adecuadamente, la comunicación HART se mantuvo durante todo este tiempo y no hubo fugas en el circuito.

- **Transmisor Indicador de Presión Smar LD-301**

Para este transmisor se realizó la misma prueba que para el anterior pero la presión se llevó hasta 200 psi. En la **Figura 71** se presenta una imagen generada por el software DDCON100 en la cual se evidencia esta verificación.

Figura 69. Presión y corriente Indicadas por el software DDCON100 para el transmisor de presión diferencial



Figura 70. Grafica de la presión, corriente y porcentaje de rango para el transmisor de presión relativa

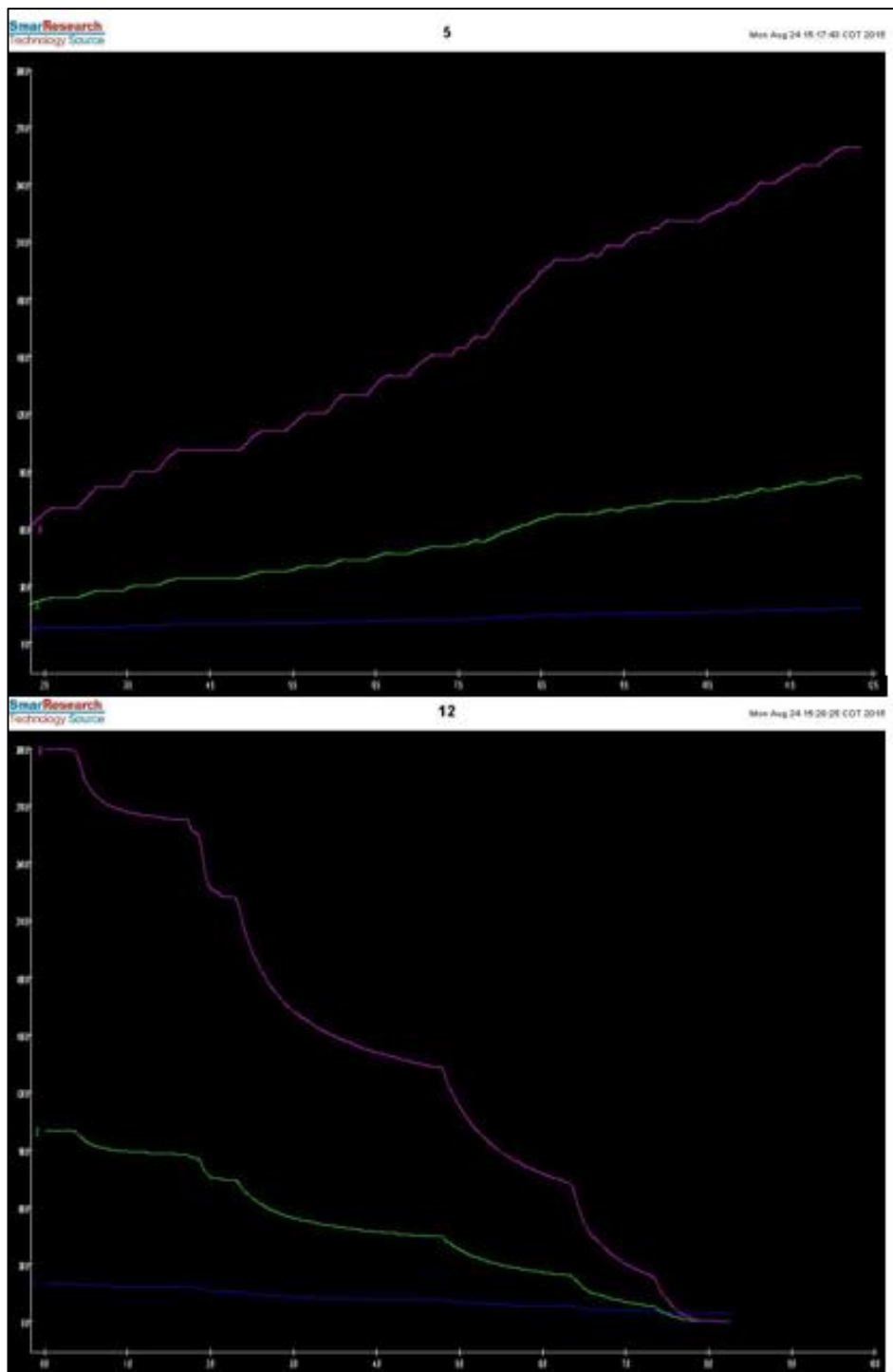
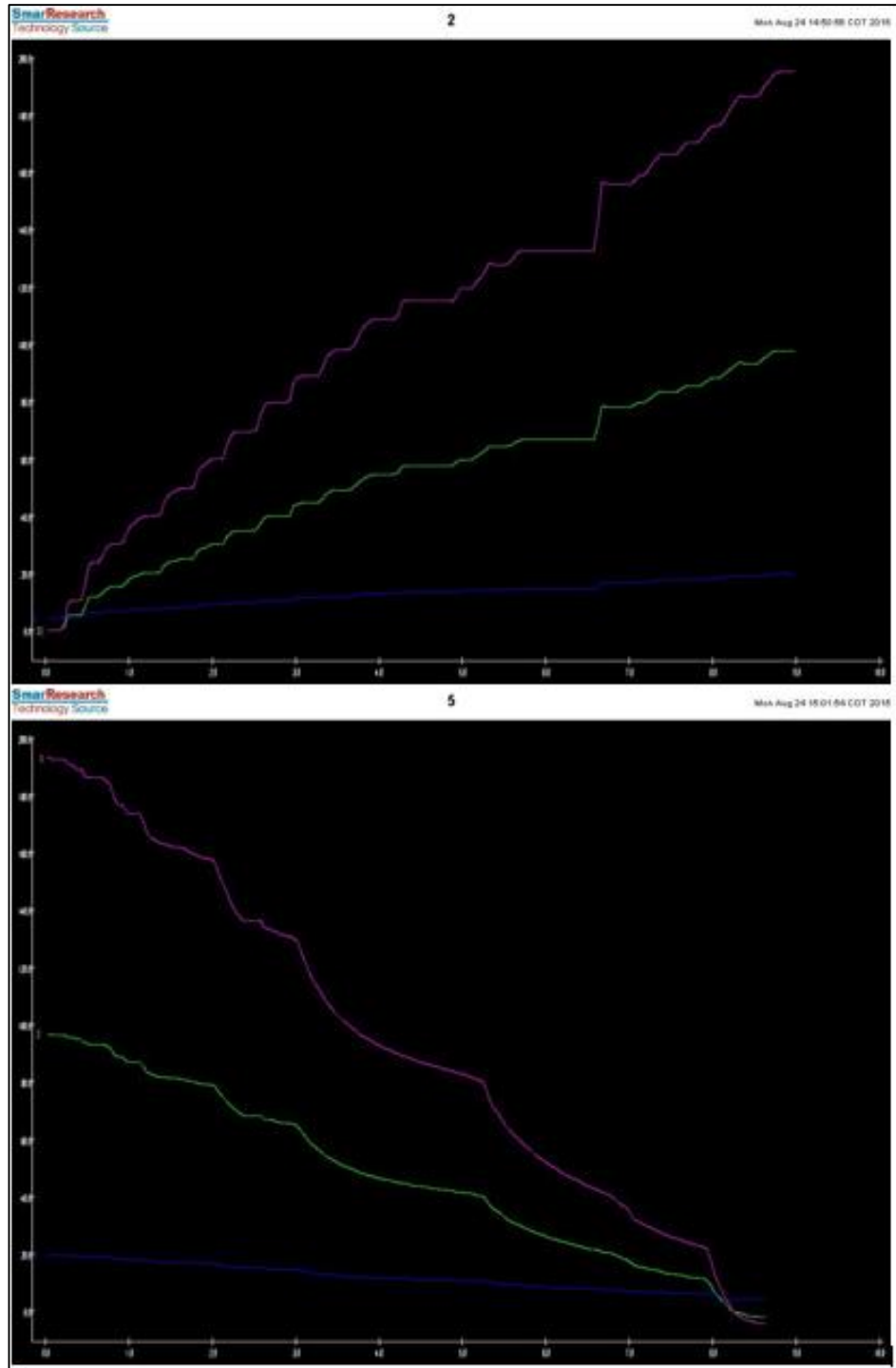


Figura 71. Grafica de la presión, corriente y porcentaje de rango para el transmisor de presión diferencial.



- **Bomba Manual FLUKE 700PTP1**

Para verificar el funcionamiento de este instrumento se llevó el circuito hasta una presión de 300 psi solo con esta bomba manual.

En la **Figura 72** se muestra la lectura del módulo de presión de 300 psi y el transmisor de presión relativa.

Figura 72. Lectura de la presión del módulo de presión FLUKE y el transmisor de presión relativa



Como se puede ver en la **Figura 72**, esta presión se logró únicamente con la bomba manual FLUKE.

- **Módulo de Presión FLUKE 700p27**

Para verificar el funcionamiento de este módulo se llevó el circuito a una presión de 300 psi y se comparó la medida con la del transmisor Smar LD291. En la **Figura 72** se puede ver esta comparación.

d. Sistema de Adquisición de Datos

Para probar el sistema de adquisición de datos se sometió el circuito de a diferentes presiones y se comparó la corriente indicada por cada transmisor y por el programa realizado en LabVIEW.

Como se puede ver en las **Figuras 66 y 67**, la corriente indicada por los transmisores fue la misma que la de LabVIEW, con esto se puede comprobar que el sistema de adquisición de datos se implementó correctamente.

2.6 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO

a. Transmisor Indicador de Presión LD-291

El LD291 es un transmisor de presión inteligente utilizado para medir presión manométrica. Su funcionamiento se basa en un sensor capacitivo que ofrece un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. El intervalo de medida de este instrumento es de 0 a 366 psi y para conectarse al circuito de presión tiene una conexión hembra de ½ pulgada NPT.

Este dispositivo es muy utilizado por su robustez y calidad de fabricación ya que puede soportar muchos factores externos que pueden afectar el proceso de medida.

Para realizar la conexión de este equipo se requiere de un lazo 4 a 20 mA que puede soportar el protocolo HART. Con este tipo de comunicación es posible realizar ajustes al transmisor sin necesidad de destaparlo o parar todo el proceso de medición.

Para visualizar la corriente y la presión que pasa por el transmisor, cuenta con un display en el cual se puede ver estas variables e incluso datos como memoria EEPROM, conversores digital-análogo entre otros.

El funcionamiento de este dispositivo es mediante un transductor capacitivo que mide la presión aplicada. En la **Figura 5** se puede ver la estructura interna de este transductor.

Figura 73. Transmisor indicador de presión Smar LD-291. ⁵¹



Fuente: SMAR LD291, transmisor inteligente de presión

b. Transmisor Indicador de Presión Smar LD-301

Este transmisor funciona con el principio capacitivo como lo hace el LD-291 pero a diferencia de este, el LD-301 sirve para medir presión diferencial.

La importancia de este tipo de medida es que una vez realizada se puede deducir otras variables como nivel y caudal. En el caso del módulo de presión implementado, este transmisor es utilizado para realizar la medición de presión en dos puntos diferentes del circuito.

⁵¹ SMAR. Op. cit., p. 46.

El intervalo de medida de este instrumento es de 0 a 360 psi.

Figura 74. Transmisor indicador de presión Smar LD291. ⁵²



Fuente: SMAR. Marketing Area, Pressure transmitter

c. Manómetros

Los manómetros utilizados en el módulo son de tipo industrial de tubo Bourdon de propósito general marca Swagelok.

⁵² SMAR. Marketing Area, Pressure transmitter [en línea] < <http://www.smar.com/marketing/ld301> > [citado en 22 de agosto de 2015]

Estos instrumentos se caracterizan por ser de los más confiables y robustos del mercado. Tiene un tamaño de esfera de 63 mm y su exactitud es de $\pm 1.5\%$ del span, lo cual los clasifica como grado B según la norma ASME B40.100, clase 1,6 según la norma EN 837-1 y de clase 1,6 según la norma JIS B7505.

Para conectarse al circuito de presión cuentan con una conexión macho de 1/4 de pulgada NPT.

Cabe resaltar que estos manómetros cuentan con glicerina en su interior la cual ayuda a prolongar su vida útil.

El intervalo de medida de estos manómetros es de: 30 psi, 60 psi, 120 psi, 200 psi y 300 psi.

Figura 75. Manómetro Swagelok. ⁵³



Fuente: SWAGELOK, Products PGI-63C-PC30-LA0X

⁵³ SWAGELOK. Products PGI-63C-PC30-LA0X [en línea]
<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=PGI-63C-PC30-LA0X&item=> [citado en 23 de agosto de 2015]

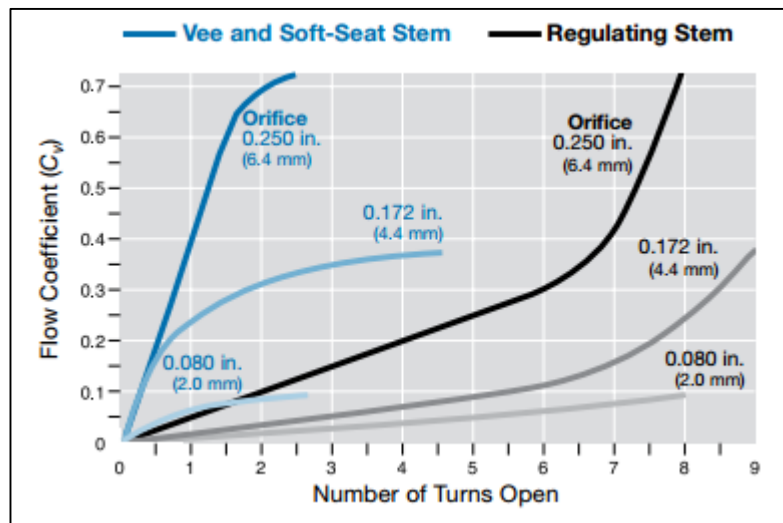
d. Válvulas de Aguja

En este módulo de presión se utilizan válvulas de aguja Swagelok serie 1 las cuales están construidas en acero inoxidable y el vástago está diseñado para tareas de regulación.

Tienen un coeficiente de caudal de 0,73.

En la **Figura 76** se observa el coeficiente de caudal según el número de vueltas de estas válvulas, la línea característica de las válvulas serie 1 es la de color negro.

Figura 76. Coeficiente de caudal, válvulas de aguja Swagelok serie 1. ⁵⁴



Fuente: SWAGelok. Integral-Bonnet Needle Valves

Con este tipo de válvulas se puede regular el caudal y flujo que pasa a través de ellas.

⁵⁴ SWAGelok. Integral- Bonnet Needle Valves [en línea]
<<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/En/MS-01-164.pdf>> [citado en 23 de agosto de 2015]

Su conexión al circuito de presión es mediante una rosca hembra de ¼ de pulgada NPT la cual es compatible con los racores Swagelok utilizados.

En la **Figura 77** se presenta una imagen de estas válvulas.

Figura 77. Válvula de aguja Swagelok.⁵⁵



Fuente: SWAGELOK. Products SS-1RF4

e. Tubo de PFA

En la industria es muy utilizado el tubing y mangueras acorazadas para la conexión de dispositivos ya que estas permiten el transporte de fluidos a alta presión.

⁵⁵ SWAGELOK. Products SS-1RF4 [en línea]

<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=SS-1RF4&item=#> [citado en 23 de agosto de 2015]

Para este módulo se utilizó manguera flexible Swagelok ya que con esta se hace más fácil el montaje y desmontaje de instrumentos, pues esta manguera se puede doblar fácilmente y para conectarla a los racores no se necesita alguna herramienta en especial.

Esta manguera es translúcida, con bajo coeficiente de rozamiento y soporta altas temperaturas. Es fabricada con Perfluoroalcohexil (PFA) y el recubrimiento de la cara interna es liso, lo cual la ayuda a tener un coeficiente de rozamiento bajo.

El diámetro de esta manguera es de $\frac{1}{4}$ de pulgada OD.

Figura 78. Manguera de PFA. ⁵⁶



Fuente: SWAGELOK. Products PFA-T4-062-100

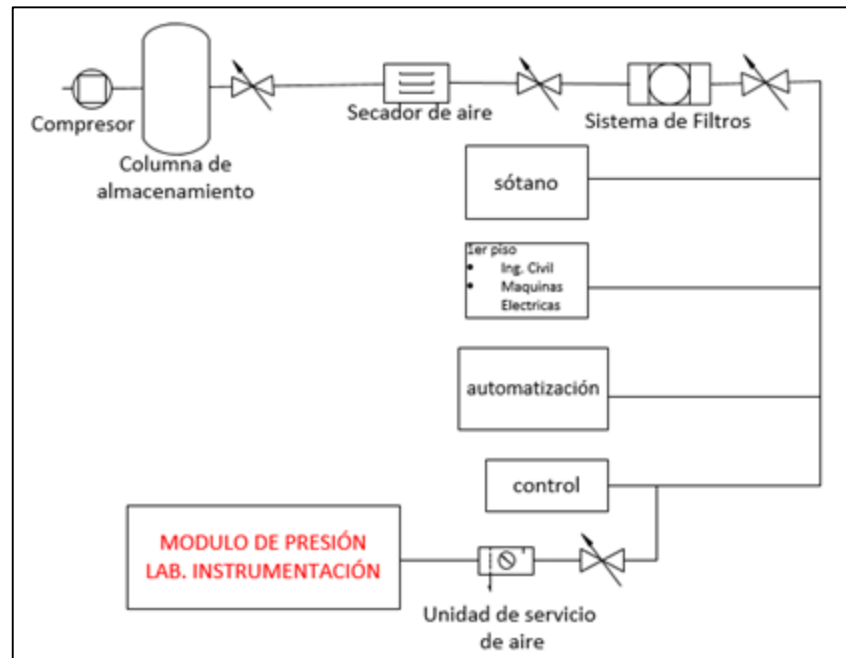
f. Suministro de Aire de Instrumentos

El aire utilizado en el módulo proviene del sistema de suministro de aire del edificio K de la Universidad Pontificia Bolivariana y consiste en un compresor que brinda hasta 200 psi. En la **Figura 79** se presenta un esquema básico de este suministro de aire.

⁵⁶ SWAGELOK. Products PFA-T4-062-100 [en línea]

<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=PFA-T4-062-100&item=> [citado en 23 de agosto de 2015]

Figura 79. Esquema básico del sistema de suministro de aire de instrumentos, edificio K. ⁵⁷



Fuente: PIMIENTA BARROS ROGER DAVID Y RODRÍQUEZ QUINTERO MAURER. Diseño de un módulo de ensayo para la medición de la variable presión, con la implementación de un circuito básico de presión relativa para el laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana.

g. Filtro Regulador de Presión

El filtro regulador de presión se conecta al suministro de aire y tiene como función principal limpiar el aire de impurezas o humedad que pueda tener.

Este filtro soporta presiones de más de 200 psi, es de marca NORGREN y cuenta con conexiones de $\frac{1}{2}$ de pulgada NPT. En la **Figura 80** se observa una imagen de este filtro.

⁵⁷ PIMIENTA BARROS ROGER DAVID y RODRÍQUEZ QUINTERO MAURER. Diseño de un módulo de ensayo para la medición de la variable presión, con la implementación de un circuito básico de presión relativa para el laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga. 2013, 133h. Trabajo de grado. (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingeniería, facultad de Ingeniería Electrónica

Figura 80. Filtro regulador NORGREN. ⁵⁸



Fuente: IMI NORGREN. Air Preparation Filter/regulator

h. Reguladores de Presión

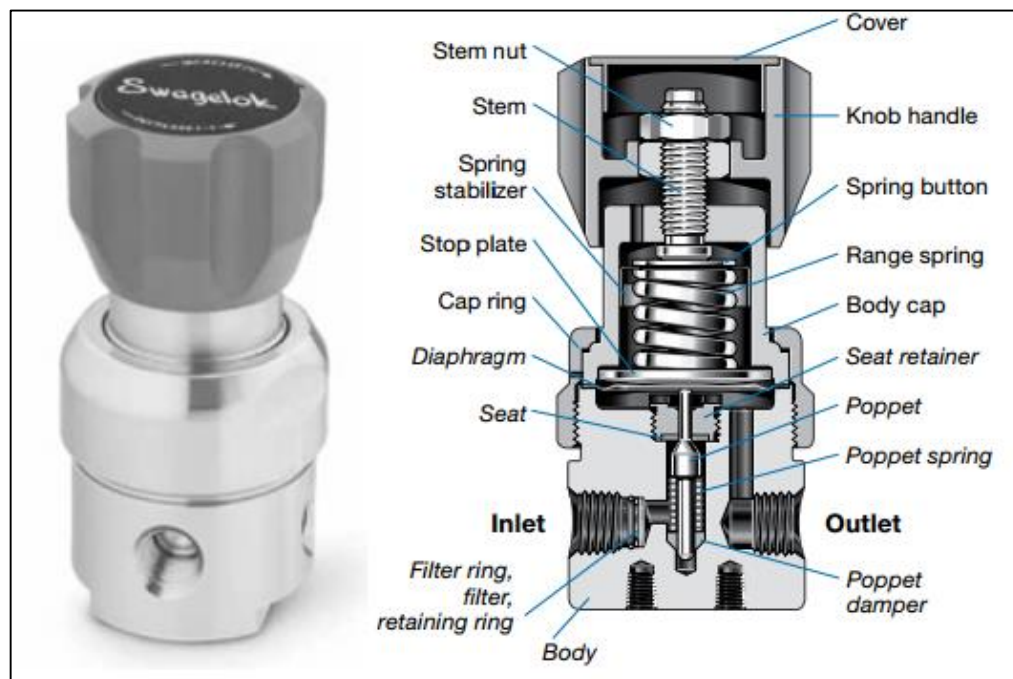
Los reguladores usados en el módulo son Swagelok de la serie KPR los cuales son reguladores de propósito general con una excelente exactitud, sensibilidad y un set point estable.

En el módulo son utilizados para mantener la presión estable en una parte del circuito e igualmente sirven para evitar daños por cambios abruptos de presión.

Estos reguladores cuentan con un filtro, el cual se usa para proteger los demás instrumentos de partículas o algunas otras impurezas provenientes de la fuente principal de suministro de aire. En la **Figura 81** se presenta una imagen de estos filtros.

⁵⁸ IMI NORGREN. Air Preparation Filter/regulator [en línea] <http://store.norgren.com/us/en/detail/air-preparation/filter_regulator/b07_233_a1ka/b07-series-filter_regulator-relieving-without-gauge-metal-bowl-auto-drain-5-%C2%B5m-5-to-100-psi-outlet-range-1_4-npt-ports> [citado en 23 de agosto de 2015]

Figura 81. Regulador de presión Swagelok. ⁵⁹



Fuente: SWAGELOK. Pressure regulators K Series

i. Bomba Manual FLUKE

La bomba manual es muy útil, permite realizar un ajuste fino de presión e inyectar presiones considerables a todo el proceso.

En este módulo se utiliza la bomba manual FLUKE 700PTP1 la cual tiene un intervalo de operación de 0 a 600 psi.

Por su calidad de construcción y operación esta bomba es utilizada en muchos procesos de calibración de manómetros. En la **Figura 82** se presenta una imagen de esta bomba.

⁵⁹ SWAGELOK. Pressure regulators K Series [en línea]
<<http://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/en/MS-02-230.PDF>> [citado en 23 de agosto de 2015]

Figura 82. Bomba manual FLUKE 700PTP1



j. Fuente Externa de 24V

Para la alimentación de los transmisores y la implementación de los lazos 4 a 20 mA se necesitó de una fuente de 24 V a 4 A, teniendo la capacidad de alimentar varios lazos de control que se pueden implementar a futuro.

Para esto se utilizó una fuente SIEMENS SITOP PSU100C que tiene como características principales su diseño compacto y consumo eficiente de energía. En la **Figura 83** se presenta la imagen de esta fuente.

Figura 83. Fuente externa de 24VDC SIEMENS SITOP PSU100C



k. Racor Swagelok

Estos conectores cumplen la función de sostener el tubo de PFA utilizado para interconectar los dispositivos.

Los racores utilizados en el módulo son Swagelok de $\frac{1}{4}$ de pulgada NPT.

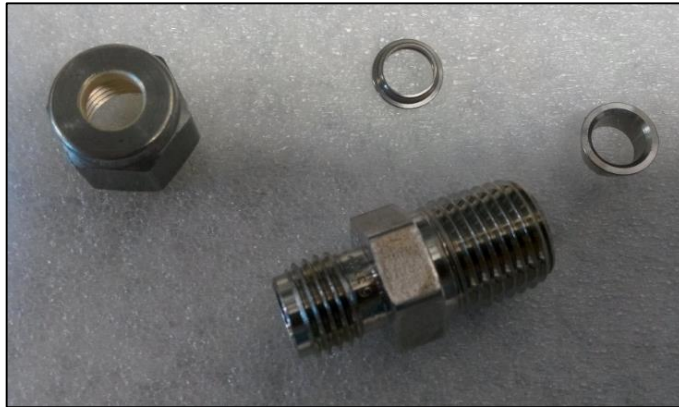
Estos conectores cuentan con el mecanismo de férula y contra férula el cual está diseñado para que sean completamente herméticos y no se presenten fugas en la conexión.

Este sistema también provee un agarre efectivo a la tubería de PFA para que no se salga del racor y se presente algún tipo de fuga.

Estos racores están hechos completamente en acero inoxidable y por su excelente sello y confiabilidad son de los más utilizados en la industria.

En la **Figura 29** se puede observar cómo funciona el sistema de férula y contra férula en estos racores junto con su respectiva explicación. En la **Figura 84** se muestra este racor junto con su férula y contra férula.

Figura 84. Racor Swagelok



I. Calibrador de Procesos FLUKE 726

Este calibrador de procesos está diseñado específicamente para la industria de procesos y cuenta con unas excelentes características de precisión. Este instrumento puede medir y generar casi todos los parámetros de procesos y calibrar prácticamente cualquier aparato. El FLUKE 726 también puede almacenar medidas para su posterior análisis.⁶⁰

Entre sus características más destacadas están:

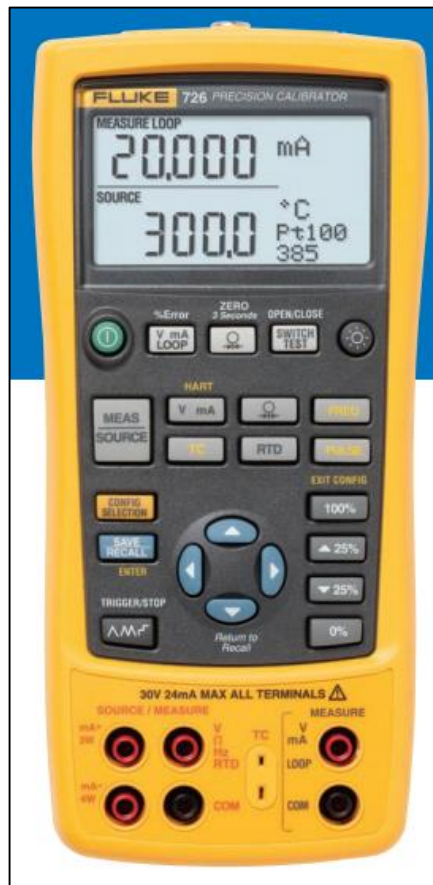
- Medidas precisas con exactitudes de 0,01%
- Memoria para almacenar hasta 8 resultados de calibración
- Compatible con instrumentos HART: simula resistencia de 250 Ohm

⁶⁰ FLUKE. Calibrador de procesos multifunción FLUKE 726 [en línea]
<<http://www.fluke.com/fluke/mxes/Calibradores-de-Procesos/Calibradores-multifuncion/Fluke-726.htm?PID=56120>> [citado en 23 de agosto de 2015]

- Medición de RTD y posibilidad de agregar constantes de calibración para RTD certificadas
- Dos canales separados; se puede medir y ver señales de proceso simultáneamente
- Mide voltajes, mA, termocuplas, frecuencia y presión para calibrar transmisores

En la **Figura 85** se muestra este instrumento.

Figura 85. Calibrador de Procesos FLUKE 726. ⁶¹



Fuente: FLUKE, FLUKE 726 Precision Multifunction Process Calibrator

⁶¹ FLUKE. FLUKE 726 Precision Multifunction Process Calibrator [en línea] <http://support.fluke.com/find-sales/download/asset/2527590_6110_eng_c_w.pdf> [citado en 23 de agosto de 2015]

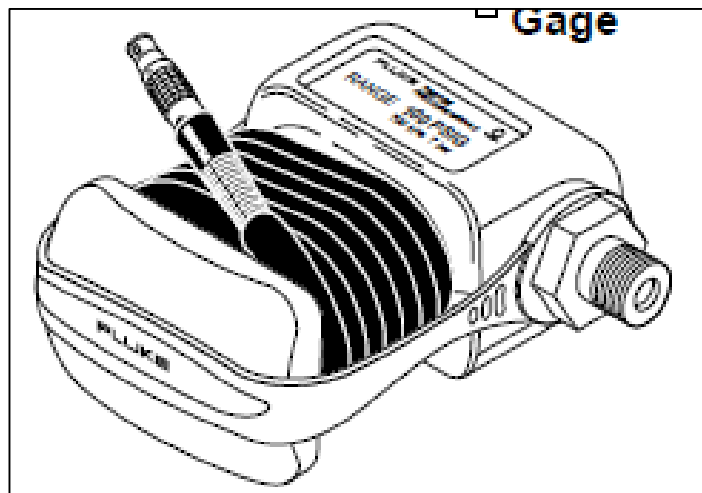
m. Módulo de Presión FLUKE 700p06

Este módulo de presión permite hacer medidas con el calibrador de procesos FLUKE 726. Este instrumento realiza la medida de presión mediante un microprocesador interno. Recibe la energía de operación y envía la información mediante el calibrador de procesos.

El intervalo de medida de este instrumento es de 0 a 100 psi y tiene una exactitud de 0,050% del span. [37]

En la **Figura 86** se presenta este instrumento

Figura 86. Módulo de presión FLUKE 700p06. ⁶²



Fuente: Fluke 700 Series Pressure Modules. Instruction Sheet

n. Módulo de Presión FLUKE 700p27

Este módulo de presión FLUKE cuenta con las mismas características que el anterior pero la diferencia es que el intervalo de medida de este es de 0 a 300 psi.

⁶² Fluke 700 Series Pressure Modules. Instruction Sheet

o. Interfaz USB de Configuración vía HART DDCON100

El Software DDCON100 es uno de los configuradores HART más robustos y versátiles, con el cual se convierte el computador en una plataforma universal de configuración de dispositivos HART.

Dentro de las características principales de este sistema están:

- Incluye todo el software y hardware necesario para realizar rápida y fácilmente la comunicación y configuración de dispositivos compatibles con HART
- Interfaz gráfica fácil e intuitiva de usar
- Los controladores de los dispositivos nuevos se pueden agregar fácilmente desde la página del fabricante
- La interface es energizada por el sistema; no requiere de fuente externa

Mediante este software y su respectiva interfaz USB se puede intervenir en el lazo 4 a 20 mA y realizar la comunicación HART con los transmisores SMAR. En la **Figura 87** se presenta una imagen de la interfaz USB de este software y en la **Figura 88** se pueden ver unas imágenes del ambiente de trabajo.

p. Diagrama P&ID del Módulo de Presión

En la **Figura 89** se presenta el diagrama P&ID para el módulo de presión.

Figura 87. Modem HART DDCON100.⁶³



Fuente: SMAR RESEARCH TECHNOLOGY SOURCE. Windows Configuration for HART – DDL Technology

⁶³ SMAR RESEARCH TECHNOLOGY SOURCE. Windows Configuration for HART – DDL Technology, DDCON100 Getting Started Guide.

Figura 88. Ambiente de trabajo del software DDCON100.

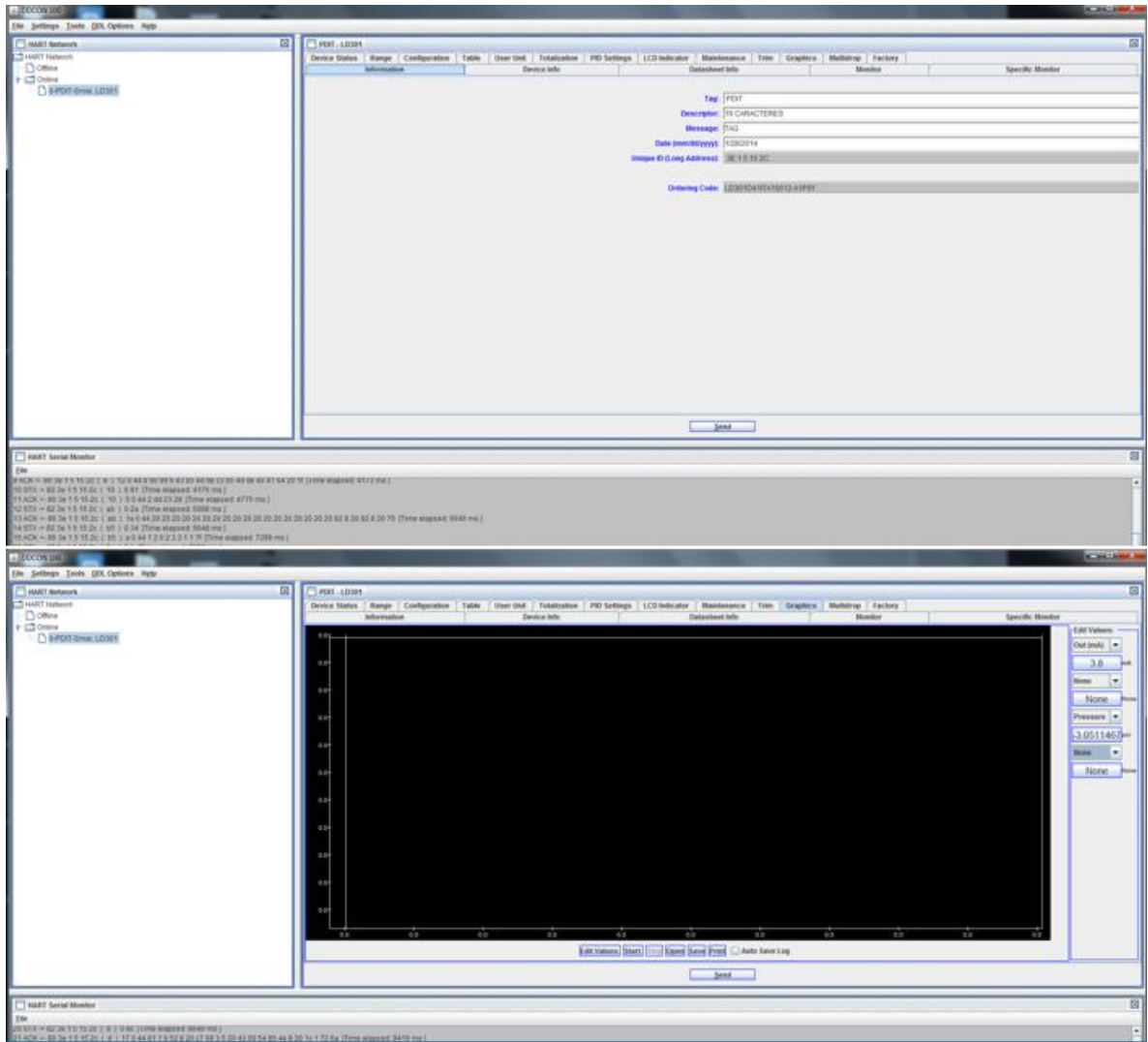
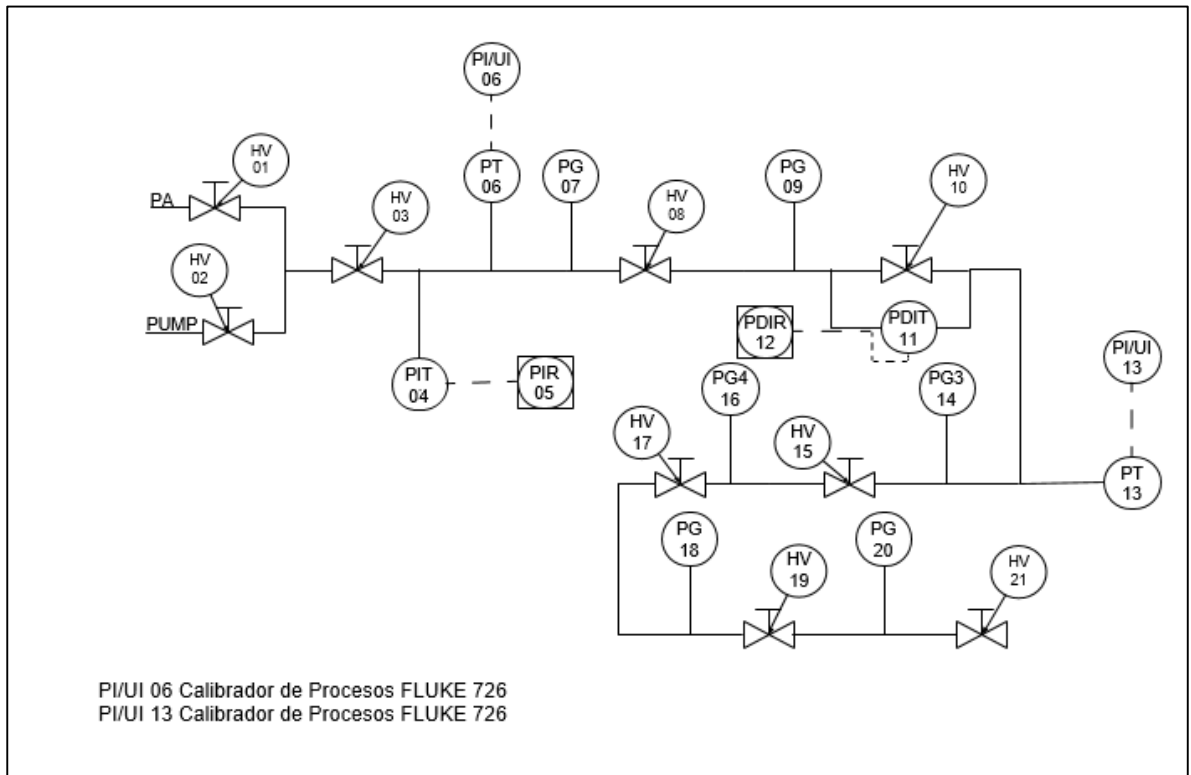


Figura 89. P&ID del módulo de presión



3 GUIA DE TRABAJO

La siguiente guía ha sido realizada en el laboratorio de instrumentación y se ha implementado con estudiantes de la especialización en control e instrumentación industrial.

En el desarrollo de la guía los estudiantes tienen la posibilidad de manejar la variable presión, manipular transmisores de presión mediante un lazo de corriente 4 a 20 mA + protocolo HART y realizar comparación de los diferentes instrumentos de medida.

**LABORATORIO DE INSTRUMENTACION
ESPECIALIZACION EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - SECCIONAL BUCARAMANGA**

- **Objetivos.**
 - a. Conocer la estructura interna y principio de operación de un medidor mecánico de presión relativa (manómetro) y de dos transmisores indicadores de presión relativa y presión diferencial con lazos 4 a 20 mA + protocolo HART.
 - b. Evaluar la repetibilidad (precisión), la histéresis y el error de salida de un transmisor indicador de presión con comunicación HART e identificar las diferencias entre un medidor mecánico y uno digital.
 - c. Valorar la importancia que tiene la comunicación HART en la transmisión de datos en un proceso industrial.
 - d. Entender el concepto de aplicación de un calibrador de procesos.

- **Procedimiento.**

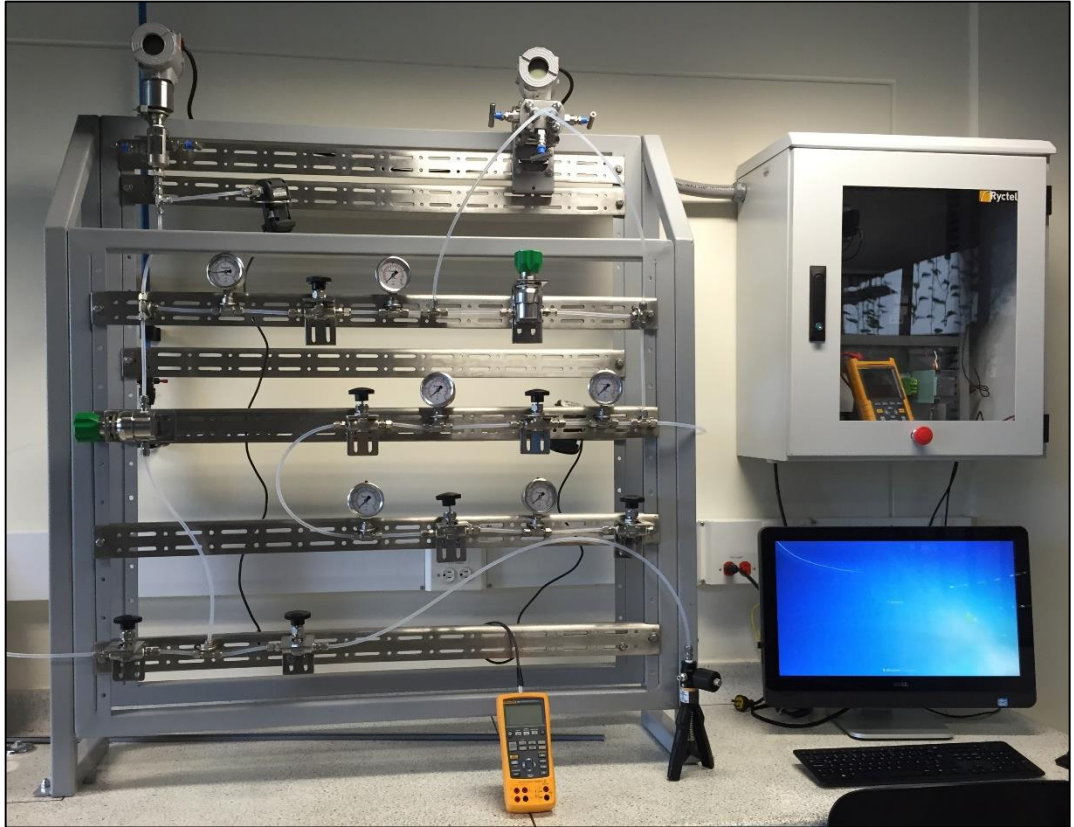
- a. Identificar la *bomba manual FLUKE*, la cual constituye el suministro de presión de aire (0 psi a 600 psi) y cuenta con una válvula reguladora de presión de entrada. En la **Figura 90** se presenta una imagen de esta bomba.

Figura 90. Bomba de presión Fluke serie 700 PTP



- b. Identificar el módulo de presión, el transmisor indicador de presión Smar. Ver **Figura 91**.
- c. Reconocer el calibrador de procesos FLUKE 726 con su módulo de presión manométrica (0 psi a 100 psi y 0 psi a 300 psi).

Figura 91. Módulo de presión



- d. Verificar el montaje del lazo de presión según el esquema de conexiones que se muestra en la **Figura 92**.
- e. Conectar el transmisor a utilizar. Conectar los terminales del configurador HART como se muestra en la **Figura 93**.
- f. Verificar en el calibrador de procesos que las entradas de presión y corriente estén en modo MEASURE.
- g. Verificar que las válvulas de entrada del manifold del PDT se encuentren cerradas. Ver **Figura 94**.

Figura 92. Conexión eléctrica para implementar lazo 4 a 20 mA + protocolo HART

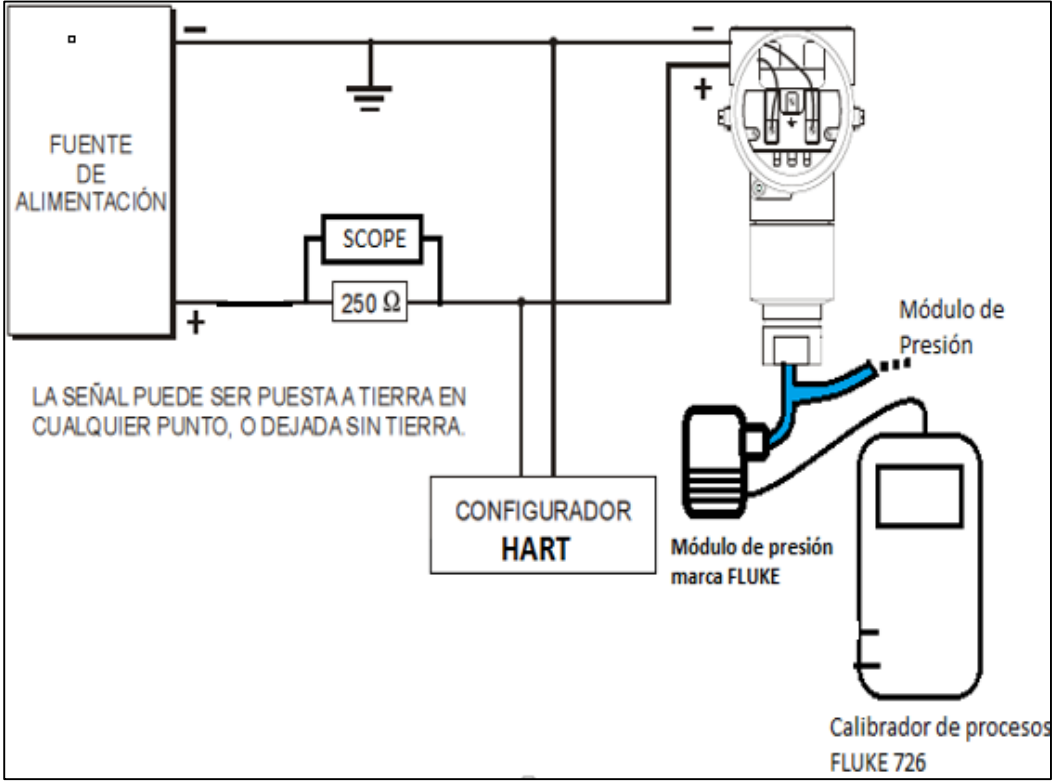
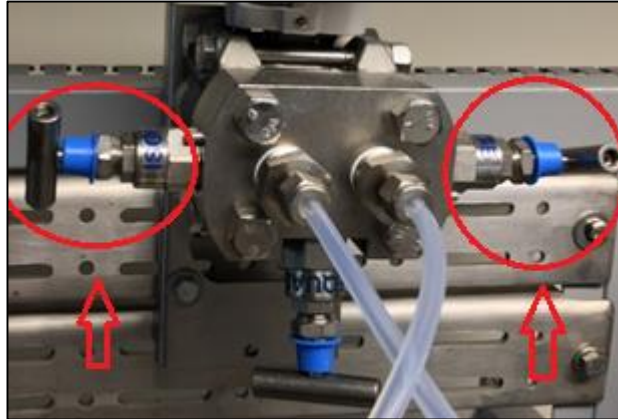


Figura 93. Lugar de conexión de los terminales del configurador HART para los transmisores de presión

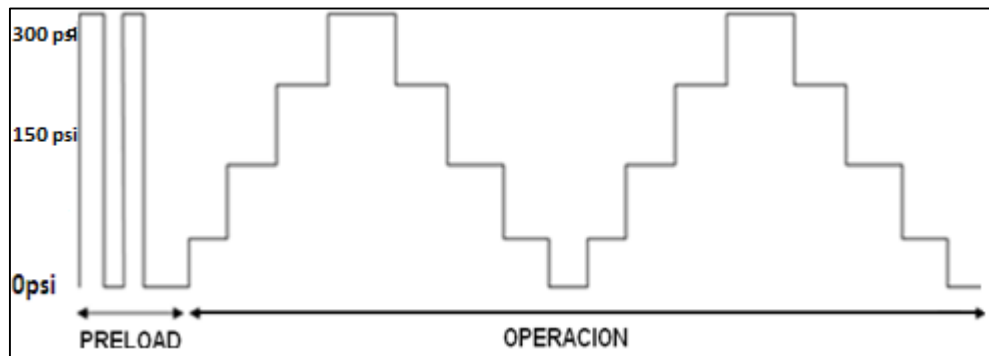


Figura 94. Válvulas del manifold de presión diferencial



- h.** Realizar un preload en todos los medidores de presión utilizando la bomba manual para ajustar la presión hasta 300 psi. El preload garantiza el correcto funcionamiento de los medidores y la dinámica interna de los dispositivos de medición (**Ver figura 95**). Tener cuidado de aislar con la respectiva válvula cada manómetro conforme vayan llegando a su *full scale*. Verificar pruebas de estanqueidad (fugas).

Figura 95. Escala de preload



- i.** En caso de no estar en cero, dar unos leves golpes en el cristal de los manómetros.

j. Abrir el programa DDCON 100. Este programa tendrá las funciones necesarias para la implementación, configuración y uso del transmisor Smar LD-291 mediante el lazo de 4 a 20 mA, a través de una configuración vía protocolo HART.

k. Garantizar que los manómetros y el transmisor se encuentren en los siguientes valores:

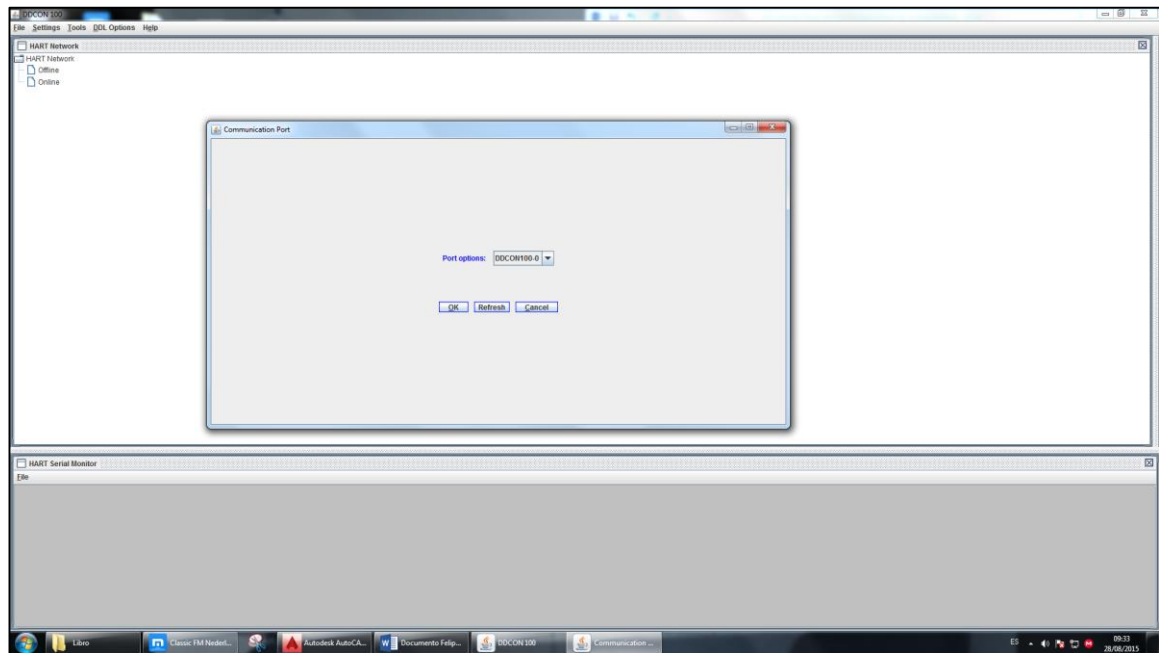
Manómetros: 0 psi.

Transmisor Smar: 0 psi.

BPCS: 4 mA – 0 psi.

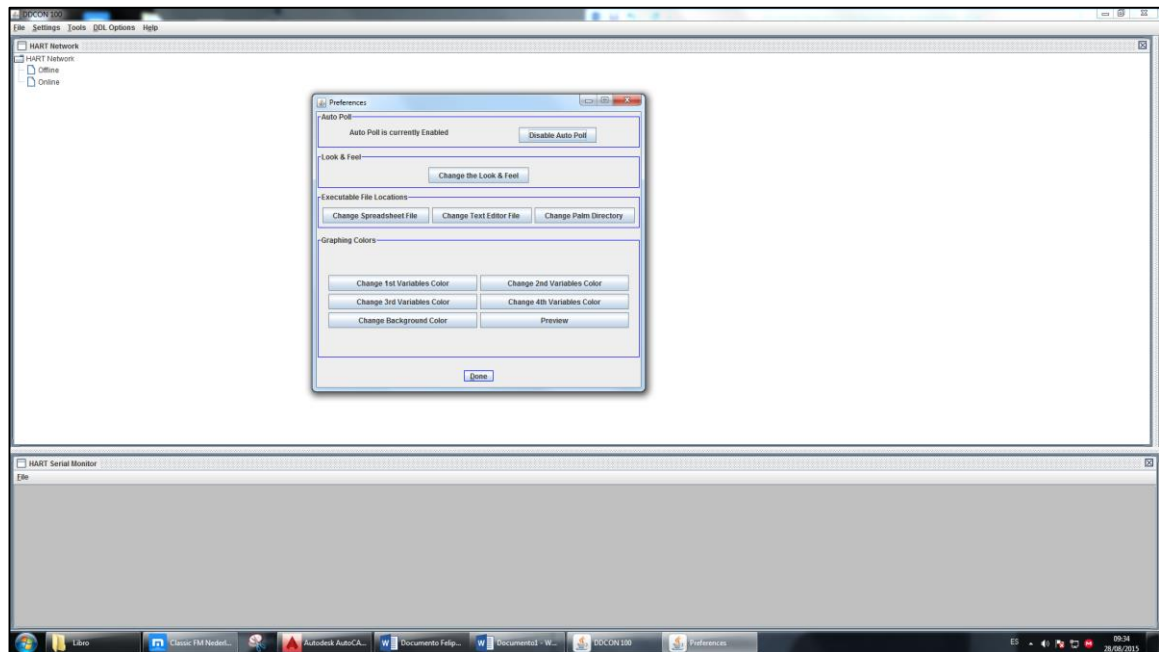
l. Verificar en el menú Settings en la opción Communication Port... que aparezca habilitado DDCON100-0, esto significa que el programa reconoció la interfaz USB y puede hacerse uso de dicha herramienta. Mirar la **Figura 96**.

Figura 96. Verificar conexión



- m. En el menú Settings en la opción Preferences verificar que está habilitado el auto poll con el cual el sistema detecta automáticamente los dispositivos conectados al lazo, en este caso detecta el transmisor de presión Smar bajo el nombre de 0-PIT-Smar, LD291, si esta opción esta deshabilitada, la búsqueda del dispositivo deberá hacerse de forma manual, ver **Figura 97**.

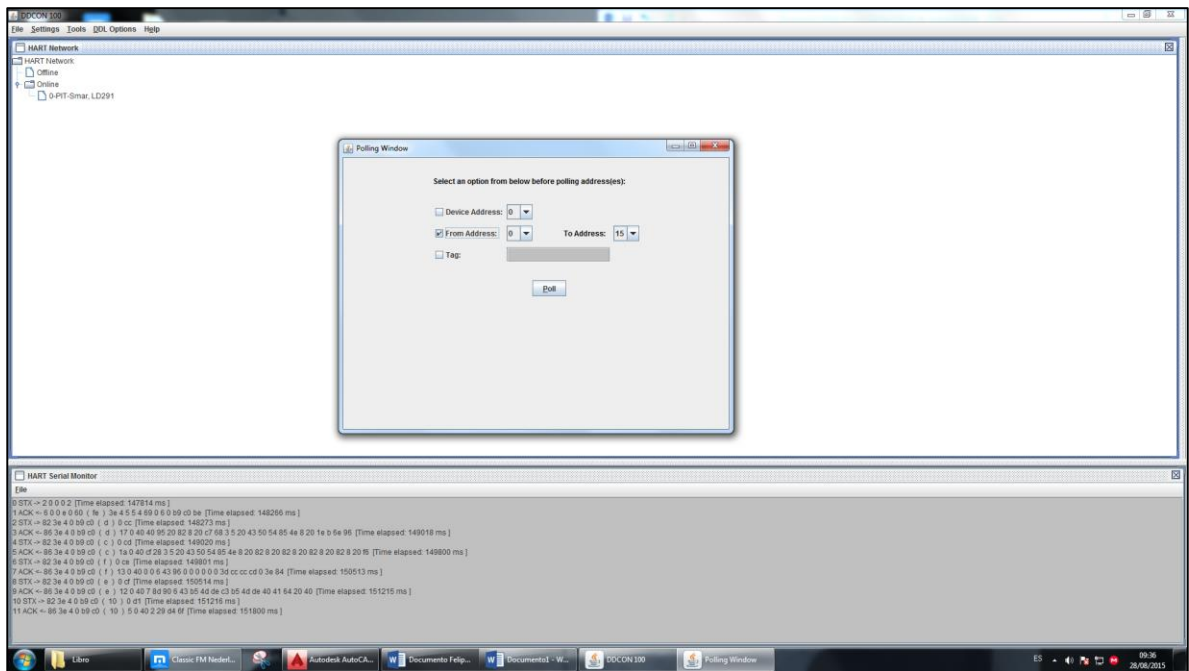
Figura 97. Verificar auto poll



- n. Para la búsqueda manual de los dispositivos conectados se debe dar click derecho en la carpeta Online que aparece en el área de trabajo llamada HART Network, luego escoger la opción polling Windows con lo cual se abrirá la ventana de la **Figura 98**.

Mediante la ventana de polling Windows se selecciona la forma en la que se quiere hacer la búsqueda del dispositivo.

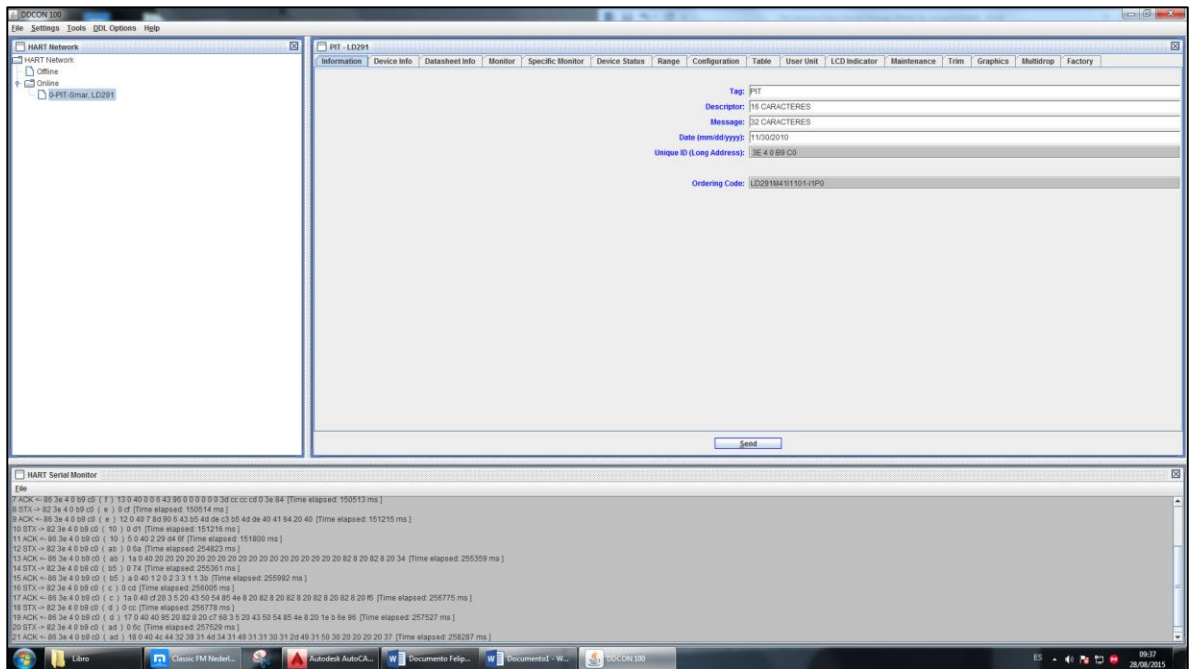
Figura 98. Opciones para búsqueda de equipos



- **Device Address:** Se utiliza si conoce la dirección del dispositivo, la cual es un número de 0-15. Dicho número corresponde a uno de los 16 dispositivos que es posible conectar en un lazo de este tipo.
 - **From Address:** Si no conoce la dirección del dispositivo esta opción realiza un sondeo de las 16 direcciones hasta que detecte los dispositivos.
 - **TAG:** Es posible encontrarla por el nombre asignado el cual recibe el nombre de TAG. En este caso el TAG es PIT (transmisor indicador de presión).
0. El programa debe reconocer el dispositivo bajo el nombre de 0-PIT-Smar,LD291. Al hacer click en el documento con ese nombre emerge una ventana con el nombre PIT – LD291, en esta se pueden realizar modificaciones y visualizar datos que arroja el transmisor de presión Smar. Explore los diferentes menús y

opciones que despliega la ventana, sin modificar los parámetros establecidos. Ver **Figura 99**.

Figura 99. Menú de ajuste



- Antes de llegar a los *full scale* de los medidores, deben cerrarse las válvulas de aislamiento con una presión fija. Observe las variaciones y diferencias entre las medidas.
- Se construirán dos curvas de ascenso-descenso del transmisor indicador de presión y de los manómetros, registrando la *Presión (Manómetros y PIT) Vs Corriente (BPCS) Vs Presión patrón (calibrador de procesos)* para el rango de 0 psi a 300 psi, cada 10 psi (Ver **Tabla 2**).
- Abrir las válvulas consecutivamente liberando las presiones desde el manómetro de 300 psi hasta llegar al de 30 psi. Esto hará que la presión del lazo sea cero.

- Asegurarse que el módulo no este energizado luego de haber obtenido los datos necesarios.

Tabla 2. Datos de Ascenso-Descenso de Presión 1.

Curva Ascenso – Descenso 1								
Calibrador de Procesos Presión (psi)	Corriente BPCS	Presión (psi)						
		PIT	PG 30	PG 60	PG 100	PG 160	PG 200	PG 300
0								
10								
20								
30								
40								
50								
60								
70								
80								
90								
100								
110								
120								
130								
140								
150								
160								
170								
180								
190								
200								
210								
220								
230								
240								
250								
240								
230								
220								
210								
200								
190								

180								
170								
160								
150								
140								
130								
120								
110								
100								
90								
80								
70								
60								
50								
40								
30								
20								
10								
0								

Tabla 3. Datos de Ascenso-Descenso de Presión 2.

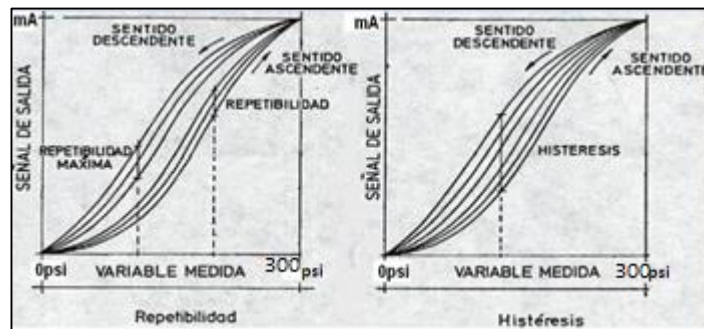
Curva Ascenso – Descenso 2								
Calibrador de Procesos Presión (psi)	Corriente BPCS	Presión (psi)						
		PIT	PG 30	PG 60	PG 100	PG 160	PG 200	PG 300
0								
10								
20								
30								
40								
50								
60								
70								
80								
90								
100								
110								
120								
130								
140								
150								

160									
170									
180									
190									
200									
210									
220									
230									
240									
250									
240									
230									
220									
210									
200									
190									
180									
170									
160									
150									
140									
130									
120									
110									
100									
90									
80									
70									
60									
50									
40									
30									
20									
10									
0									

Cerrar Válvula de Corte

Cerrar Válvula de Corte

Figura 100. Graficas de repetibilidad e histéresis. ⁶⁴



Fuente: Solé Creus Antonio. Instrumentación industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. 792 p. ISBN 978-607-707-042-9

- **Resultados.**

- a. En una misma gráfica **Presión (Calibrador de procesos) Vs Corriente (BPCS)**, muestre las 2 curvas de ascenso-descenso, y a partir de estas determine la máxima histéresis y la máxima repetibilidad del PIT.
- b. En una misma gráfica **Presion (PIT) Vs Corriente (BPCS)**, muestre las 2 curvas de ascenso-descenso y a partir de estas determine la linealidad del PIT.
- c. Calcular para el PIT y cada manómetro, los **errores máximos** de cada instrumento comparándolos con la lectura de la presión patrón (calibrador de procesos).

3.1 PRESTACIÓN DE SERVICIOS

- **Servicios Prestados a la Especialización en Control e Instrumentación Industrial de la Facultad de Ingeniería Electrónica**

⁶⁴ CREUS. Op. cit., p. 8.

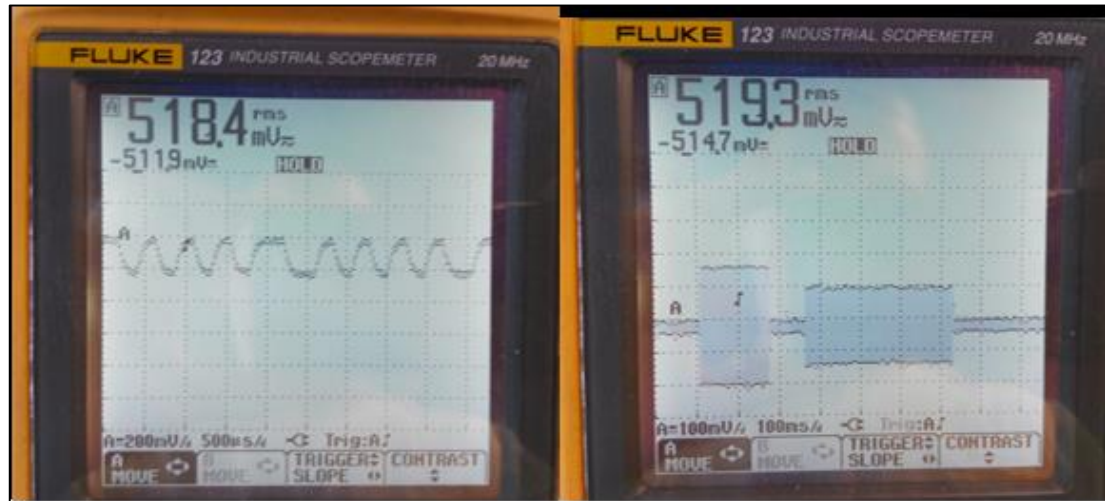
El módulo de presión fue utilizado por los estudiantes de la especialización en control e instrumentación industrial en sus prácticas de laboratorio, de este modo los estudiantes se familiarizaron con instrumentos que se encuentran actualmente en la industria como: calibradores de procesos, manómetros y transmisores de presión, e igualmente con conceptos como el lazo de control 4 a 20 mA y la comunicación por protocolo HART. En la **Figura 101** se presenta una imagen del módulo de presión con un estudiante de posgrado.

Otro servicio prestado a la especialización fue a un estudiante quien solicitó información del protocolo HART para su monografía, gracias a los equipos presentes en el módulo de presión se le pudo brindar al estudiante imágenes sobre la trama del protocolo de comunicación HART. En la **Figura 102** se presentan estas imágenes.

Figura 101. Estudiante de la especialización en control e instrumentación industrial realizando las prácticas de laboratorio con el módulo de presión.



Figura 102. Imágenes de la trama del protocolo HART suministradas a un estudiante de la especialización en control e instrumentación industrial para su monografía.



- **Servicios Prestados al Laboratorio de Instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana**

Otro servicio prestado durante la implementación del módulo de presión fue la instalación de filtros reguladores de presión en los diferentes módulos del laboratorio de instrumentación.

Mediante estos reguladores se complementan los estudios de las diferentes variables e igualmente son utilizados en muchas ocasiones para realizar la limpieza de los instrumentos utilizados en cada módulo. En la **Figura 103** se presenta una imagen con estos filtros instalados.

Figura 103. Filtros reguladores instalados en el laboratorio de instrumentación



- **Servicios Prestados al VI Seminario Internacional de Ingeniería Electrónica**

El VI Seminario internacional de ingeniería electrónica se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana del 25 al 29 de agosto de 2014.

Aquí se divulgaron y discutieron temas en las áreas de control, telecomunicaciones y bioingeniería, e igualmente se contó con invitados de talla internacional.

El servicio prestado por el módulo de presión fue traer un stand de la empresa Swagelok. En este stand la empresa expuso varios de sus instrumentos e igualmente un ingeniero representante de la marca se encontraba para resolver cualquier inquietud técnica que se tuviese sobre alguno de estos aparatos. En la **Figura 104** se muestran algunos de los instrumentos presentados por Swagelok.

Figura 104. Productos del stand de Swagelok. ⁶⁵



Fuente: Swagelok Colombia. [en línea] < <http://www.swagelokcolombia.com/>>
[Citado en 03 de septiembre de 2015]

⁶⁵ Swagelok Colombia. [en línea] < <http://www.swagelokcolombia.com/>> [Citado en 03 de septiembre de 2015]

RECOMENDACIONES

Como medida de seguridad principal, se recomienda utilizar gafas y bata de laboratorio cuando se esté trabajando en el módulo, ya que los instrumentos con los cuales se trabaja soportan y generan presiones considerables.

Cuando se esté utilizando el módulo se recomienda siempre tener a la mano la guía de manejo, ya que esta contiene el paso a paso para manipular los instrumentos de forma segura y adecuada.

Siempre que se realice algún cambio en la tubería que interconecta los diferentes elementos, se aconseja desechar la férula y contra férula utilizada y cambiarlas por un juego totalmente nuevo. De esta manera se asegura la estanqueidad de todo el circuito de presión.

Cuando se estén realizando medidas con los manómetros, no llevarlos al 100% de su escala ya que si por algún motivo ocurre un cambio brusco en la presión del sistema estos se pueden llegar a dañar.

Cuando se necesite desmontar algún transmisor, asegurarse siempre que el sistema no este presurizado y que las válvulas de los manifold estén cerradas, de este modo se resguarda al usuario de partículas que estén en el circuito de presión y salgan despedidas hacia él.

Cuando se instalen nuevos aparatos o se cambien de lugar alguno de los instrumentos del módulo, realizar siempre pruebas de estanqueidad para garantizar que no haga fugas en las conexiones. Igualmente siempre que se realicen este tipo de pruebas es aconsejable utilizar el líquido detector de fugas de Swagelok, pues esta solución no contiene elementos corrosivos que puedan dañar los instrumentos y hace burbujas hasta con fugas muy pequeñas.

CONCLUSIONES

Se implementó un módulo de presión mediante instrumentos mecánicos y electrónicos, con el cual se da soporte a las facultades de ingeniería electrónica, mecánica e industrial en sus pregrados y posgrados, en el estudio sobre la variable presión, comparando las medidas de los diferentes instrumentos disponibles.

Se creó una guía de manejo para el módulo, en la cual se presenta el paso a paso para la manipulación de los sensores y toma de mediciones. Esta guía se ha implementado con los estudiantes de la especialización en control e instrumentación industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, aquí los estudiantes interactúan con la variable presión, e igualmente con instrumentos de tipo industrial y conceptos como la comunicación 4 a 20 mA y el protocolo HART.

El circuito de presión cuenta con los módulos de presión FLUKE 700p06 y FLUKE 700p27, estos módulos son los instrumentos patrones ya que cuentan con certificado de calibración de los laboratorios FLUKE. Contar con instrumentos de este tipo es muy útil ya que cuando se toman las medidas se puede ver la diferencia con los instrumentos de menor resolución, y en cierta medida ayuda a que la incertidumbre disminuya.

La variable presión es de las más medidas en la industria, pues mediante esta se pueden definir otros parámetros tan importantes en un proceso como: flujo, nivel y caudal. También es una variable que puede variar muy rápido y esto hace que los demás parámetros del proceso también se vean afectados, por esta razón instrumentos como los filtros reguladores de presión como los implementados en el módulo son muy utilizados en la industria, pues estos ayudan a tener una presión estable y de este modo se puede mantener controladas las demás variables de proceso y preservan los instrumentos que no son tan resistentes a los cambios abruptos en la presión.

Para la visualización de las medidas realizadas por los transmisores de presión Smar LD-291 y LD-301 se implementaron dos lazos 4 a 20 mA que cuentan con comunicación vía protocolo HART. Adicionalmente se implementó un sistema de adquisición de datos por medio de una tarjeta de entradas de corriente de NATIONAL INSTRUMENTS y el software LabVIEW, con este sistema se puede monitorear la corriente de cada transmisor desde el computador, y por medio del software DDCON100 se puede llevar un histórico gráfico de la presión y corriente de cada uno de estos instrumentos, ajustar los diferentes parámetros de estos transmisores y visualizar si alguno presenta fallas.

Cuando se estén seleccionando accesorios como conectores y uniones es importante definir qué tipo de rosca se está utilizando, ya que en el mercado existen muchos tipos, siendo la rosca NPT la más utilizada. Además es importante determinar si está utilizando una rosca tipo cónica o plana, pues si se conecta una unión plana con conector cónico o viceversa, se van a presentar fugas en esta conexión.

Se realizó una revisión de la ingeniería de detalle de la fase anterior del módulo, en la cual se corrigieron algunos aspectos como; racores, uniones y accesorios a utilizar. Mediante esta revisión se dio solución a las fugas que se presentaban en las conexiones y se adquirieron instrumentos para complementar el estudio de la variable.

La implementación de herramientas de como AutoCAD es de gran ayuda, ya que por medio de un diseño previo es posible detectar fallas y corregirlas antes de realizar la implementación. Igualmente cuando se necesite realizar modificaciones se pueden realizar inicialmente sobre el diseño y evaluar si es posible llevar a cabo la modificación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Solé Creus Antonio. Instrumentación industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. 792 p. ISBN 978-607-707-042-9

[2] Luetich J. J. UNIDADES DE PRESIÓN. [en línea] <<http://www.luventicus.org/articulos/03A001/index.html>> [citado en 9 de Agosto de 2015]

[3] LIBRAS POR PUGADA CUADRADA, KSI, MAGNITUD, CONVERSION. [en línea] http://centrodeartigos.com/articulos-de-todos-los-temas/article_31376.html [citado en 9 de agosto de 2015]

[4] PROFESOR EN LINEA, presión atmosférica [En línea] <<http://www.profesorenlinea.cl/fisica/PresionAtmosferica.htm>> [Citado en 9 de agosto de 2015]

[5] MASMAR, METROLOGÍA NAUTICA, unidades de presión [En línea] <<http://www.masmar.com/articulos/art/114,1630,2.html>> [Citado en 9 de agosto de 2015]

[6] ECURED CONOCIMIENTO CON TODOS Y PARA TODOS, Baria(unidad) [En línea] <[http://www.ecured.cu/index.php/Baria_\(unidad\)](http://www.ecured.cu/index.php/Baria_(unidad))> [Citado en 9 de agosto de 2015]

[7] TIPOSDE.ORG PORTAL EDUCATIVO. Tipos de presión [En línea] <<http://www.tiposde.org/ciencias-naturales/357-tipos-de-presion/>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

[8] CABRERA RICARDO. PRESIONES ABSOLUTAS Y RELATIVAS [En línea] <http://ricuti.com.ar/No_me_salén/FLUIDOS/FT_baromet.html> [Citado en 10 de agosto de 2015]

[9] ECURED. Pascal (unidad) [en línea] [http://www.ecured.cu/index.php/Pascal_\(unidad\)](http://www.ecured.cu/index.php/Pascal_(unidad)) [Citado en 11 de agosto de 2015]

[10] BURGOS TOMÁS. Manómetros [en línea] <<http://www.sabelotodo.org/aparatos/manometros.html>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

[11] Sapiensman. Conceptos básicos de neumática e hidráulica, dispositivos de control y medida de la presión [En línea] <<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>> [Citado en 10 de agosto de 2015]

[12] DE WIT, Orientación para la selección e instalación de manómetros [En línea] <http://www.cari.com.mx/Catalogos/Catalogo_De_Wit_Completo.pdf> [Citado en 10 de agosto de 2015]

[13] SMAR - LD291. TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN, manual de instrucciones, operación y mantenimiento, Versión 6, 2012

[14] VILLAJUNCA JOSÉ CARLOS. La señal 4-20mA y su proporción a variables físicas: nunca esta de mas repararlo. [en línea] <<http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/curso-practico-de-instrumentacion/item/345-la-se%C3%B1al-4-20ma-y-su-proporci%C3%B3n-a-variables-fisicas-nunca-esta-de-mas-repararlo.html>> [citado en 10 de agosto de 2015]

[15] BLOG INSTRUMENTACIÓN.COM. señales de salida analógicas en la instrumentación [en línea]. <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2011/09/08/senales-de-salida-analogicas-en-la-instrumentacion/>> [citado en 10 de agosto de 2015]

[16] HART COMMUNICATION FOUNDATION. Cómo funciona HART [en línea] <http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html> [citado en 10 de agosto de 2015]

[17] EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Introducción al HART [en línea] http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Buses_201_es.pdf > [citado en 10 de agosto de 2015]

[18] CELSIUS SMART. Que es la metrología [en línea] <http://www.celsiusmetrologia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=36:ique-es-la-metrologia&catid=13:noticias&Itemid=40> [citado en 10 de agosto de 2015]

[19] VIM. VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y GENERALES, Y TÉRMINOS ASOCIADOS [en línea] <<http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>> [citado en 10 de agosto de 2015]

[20] CORDOBA BENJUMEA FABIAN ANDRES Y DUEÑAS MORENO JUAN CAMILO: Ingeniería conceptual del sistema de aseguramiento metrológico del módulo de temperatura del laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga, 2015, 341h. Trabajo de grado (Ingeniero

Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Electrónica. Escuela de Ingeniería

[21] SWAGELOK. Roscas y Conexiones finales. [en línea]. <<https://www.swagelok.com.mx/downloads/webcatalogs/es/ms-13-77.pdf>> [citado en 14 de agosto de 2015]

[22] SWAGELOK. Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings [en línea] <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-01-140.pdf>> [citado en 15 de agosto de 2015]

[23] SWAGELOK. Products ss-400-7-4 [en línea] <http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=SS-400-7-4&item=> [citado en 16 de agosto de 2015]

[24] SWAGELOK. Products ss-8-cn [en línea] <<http://www.swagelok.com/search-results/search-results.aspx?qs=ss-8cn> [citado en 16 de agosto de 2015]

[25] CEDEC COMPONENTES Y DISPOSITIVOS ESPECIALES. Fluke 700p27. [en línea] <<http://www.cedesa.com.mx/fluke/calibradores/modulos-presion-calibradores/700P27/>> [citado en 18 de agosto de 2015]

[26] TUV NORD CUALICONTROL. Pruebas de estanqueidad en tuberías [en línea] <<http://www.tuv-nord.com/es/asistencia-tecnica-industrial/pruebas-de-estanqueidad-527.htm>> [citado en 21 de agosto de 2015]

[27] SMAR. Marketing Area, Pressure transmitter [en línea] <<http://www.smar.com/marketing/ld301>> [citado en 22 de agosto de 2015]

[28] SWAGELOK. Products PGI-63C-PC30-LAOX [en línea]
<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=PGI-63C-PC30-LAOX&item=> [citado en 23 de agosto de 2015]

[29] SWAGELOK. Integral- Bonnet Needle Valves [en línea]
<<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/En/MS-01-164.pdf>> [citado en 23 de agosto de 2015]

[30] SWAGELOK. Products SS-1RF4 [en línea]
<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=SS-1RF4&item=#> [citado en 23 de agosto de 2015]

[31] SWAGELOK. Products PFA-T4-062-100 [en línea]
<http://www.swagelok.com/search/find_products_home.aspx?part=PFA-T4-062-100&item=> [citado en 23 de agosto de 2015]

[32] PIMIENTA BARROS ROGER DAVIR Y RODRÍGUEZ QUINTERO MAURER. Diseño de un módulo de ensayo para la medición de la variable presión, con la implementación de un circuito básico de presión relativa para el laboratorio de instrumentación de la universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga. 2013, 133h. Trabajo de grado. (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingeniería, facultad de Ingeniería Electrónica

[33] IMI NORGREN. Air Preparation Filter/regulator [en línea]
<http://store.norgren.com/us/en/detail/air-preparation/filter_regulator/b07_233_a1ka/b07-series-filter_regulator-relieving-without-gauge-metal-bowl-auto-drain-5-%C2%B5m-5-to-100-psi-outlet-range-1_4-npt-ports> [citado en 23 de agosto de 2015]

[34] SWAGELOK. Pressure regulators K Series [en línea] <<http://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/en/MS-02-230.PDF>> [citado en 23 de agosto de 2015]

[35] FLUKE. Calibrador de procesos multifunción FLUKE 726 [en línea] <<http://www.fluke.com/fluke/mxes/Calibradores-de-Procesos/Calibradores-multifuncion/Fluke-726.htm?PID=56120>> [citado en 23 de agosto de 2015]

[36] FLUKE. FLUKE 726 Precision Multifunction Process Calibrator [en línea] <http://support.fluke.com/find-sales/download/asset/2527590_6110_eng_c_w.pdf> [citado en 23 de agosto de 2015]

[37] Fluke 700 Series Pressure Modules. Instruction Sheet

[38] SMAR RESEARCH TECHNOLOGY SOURCE. Windows Configuration for HART – DDL Technology, DDCON100 Getting Started Guide.

[39] BLOGINSTRUMENTACION. Sistemas de instrumentación de presión mecánica [en línea] <<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2012/03/16/sistemas-de-instrumentacion-de-presion-mecanica/#!prettyPhoto>> [citado en 24 de agosto de 2015]

[40] PIONEER ENTERPRISE. Manifold Valves [en línea] <<http://www.instrumentation-fittings.com/manifolds-valves.html>> [citado en 26 de agosto de 2015]

[41] SWAGELOK, Instrument Manifolds [en línea] <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/En/MS-01-178.pdf>> [citado en 26 de agosto de 2015]

[42] ANDERSON GREENWOOD INSTRUMENTATION PRODUCTS. Manifolds and Accessories [en línea] <http://valves.pentair.com/valves//resources/AGIMC-0344-US_Pressure_Manifolds-EN.pdf> [citado en 26 de agosto de 2015]

[43] Universidad Pontificia Bolivariana. Laboratorio de Vibraciones [en línea] <<http://vibra.upbbga.edu.co/index.html>> [Citado en 28 de agosto de 2015]

[44] Swagelok Colombia. [en línea] < <http://www.swagelokcolombia.com/>> [Citado en 03 de septiembre de 2015]

Anexos

Anexo A.
Especificaciones del
Módulo de Presión FLUKE
700p06.
(CD)

Anexo B.
Especificaciones del
Módulo de Presión FLUKE
700p27.
(CD)

Anexo C.

Especificaciones técnicas
de manómetros Swagelok
(CD)

Anexo D.

Especificaciones técnicas
de reguladores de presión
y válvulas Swagelok
(CD)

Anexo E.

Especificaciones técnicas
del transmisor de presión
Smar LD-291
(CD)

Anexo F.
Especificaciones técnicas
del transmisor de presión
Smar LD-301
(CD)

Anexo G.
Especificaciones técnicas
de la bomba manual
FLUKE 700PTP1
(CD)

Anexo H.

Especificaciones técnicas
del calibrador de procesos
FLUKE 726
(CD)

Anexo I.
Especificaciones técnicas
del sistema de adquisición
de datos
(CD)