

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.

ROGER DAVID PIMIENTA BARROS
MAURER RODRÍGUEZ QUINTERO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2013

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.

ROGER DAVID PIMIENTA BARROS
MAURER RODRÍGUEZ QUINTERO

PROYECTO DE GRADO

JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
DIRECTOR DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2013

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2013

DEDICATORIA.

A Dios, por cada uno de los detalles que tiene conmigo, demostrándome siempre que la vida está llena de propósitos y metas por alcanzar, regalándome siempre muchas bendiciones y el privilegio de generar muchas de estas a las personas que comparten conmigo. Quien cuando trate de bajar mis brazos no dudo en generar circunstancias, darme motivos y muchas bendiciones que hoy me tienen sobre una meta alcanzada, y dotado de cualidades para ir por nuevos objetivos y propósitos, que siempre tiene para mí.

A una de las mayores bendiciones y motivaciones que Dios me ha podido obsequiar desde el día en que me regaló la vida, mi familia; quienes son personas maravillosas, que siempre me brindan de forma incondicional y sin reparo alguno su apoyo, y lo mejor de todo, ese amor y todos los valores que me han compartido, convirtiéndose en un impulso para dar siempre pasos hacia adelante.

A esas personas especiales en mi vida, que han tenido y tienen siempre valiosos consejos, motivaciones y espacios que han generado fundamentos para alcanzar mis objetivos.

A mis amigos y compañeros que siempre han tenido algo que enseñarme y sonrisas por compartirme.

MAURER RODRÍGUEZ QUINTERO

A Dios por darme tantas bendiciones y oportunidades a lo largo de mi vida, por su protección y misericordia, por brindarme salud y bienestar a mí y a toda mi familia. También por ponerme en el camino correcto y no dejarme caer en los momentos difíciles, por darme fuerza y ayudarme siempre a perseverar y alcanzar mis objetivos aunque sea difícil el camino.

A mi mamá Clara O. Barros Rivadeneira, por su excelente crianza y ejemplo. Por el apoyo, comprensión, guía y amor que me brinda día a día, pero sobre todo por la paciencia que ha tenido conmigo, porque no sé si seré un gran hijo, pero gracias a Dios me toco una gran madre. Por ser mi motivo de orgullo y por sacarnos adelante a mi hermana y a mí, contra todo pronóstico, con mucho esfuerzo y dedicación.

A mi papá Rogelio Rafael Pimienta Varela, que en paz descansa. Esa persona que ayudo a formar gran parte de mi carácter y me supo transmitir valores de compañerismo, honestidad y apoyo a quien más lo necesita. Por darme tantas lecciones de vida, aunque fue temprana su partida. Por sus concejos que estarán siempre en mi memoria y por ser siempre mi ejemplo a seguir, además porque sé que desde el cielo me cuidas.

A mi hermana Ada R. Pimienta Barros, por aconsejarme y apoyarme en el transcurso de mi vida, que con sus muestras de madures y entrega en el cumplimiento de sus objetivos ha sido un ejemplo y motivo de orgullo para todos los integrantes de mi familia.

Para Jazquel Quintero Bueno, por ser esa persona que a pesar de todos los obstáculos y dificultades me ha ayudado a sortearlos. La persona con la que con mucha amor y cariño deseo formar una familia, quien me ha brindado consejo y apoyo en momentos difíciles y que a pesar de mis defectos siempre esta ahí a mi lado.

A mi abuelita Rafaela Varela, mi abuelito Carlos Pimienta y mi abuelo papá Juan, quienes desde el cielo me cuidan y a quienes doy gracias por todo su amor, cariño y momentos inolvidables. También por sus enseñanzas y ejemplo, por inculcarme valores de humildad, respeto y honestidad.

Por mi abuela mamá Maye que aun nos acompaña y que con su paciencia y dedicación contribuyo a gran parte de mi crianza, por su apoyo y su ejemplo. También por seguirnos alegrando con su compañía y porque sea así por muchos años más.

A mis tías Rudys Beatriz Barros Rivadeneira y Verenitce Pimienta Varela, por siempre ser un ejemplo para mí. Por contribuir a mi educación con sus consejos y cuidados, además por el apoyo que le han brindado a toda la familia, el cual siempre ha sido de manera incondicional.

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla Saavedra por la confianza depositada en nosotros, por brindarnos la oportunidad de trabajar en este proyecto y brindarnos su dirección y apoyo. Por creer en los estudiantes sin excepciones, además por brindarle la oportunidad a todo el que tenga deseos de trabajar. Por su entrega, compañerismo, orientación, consejo y sobre todo por la paciencia que me ha tenido como estudiante.

A todos mis familiares y amigos que hicieron parte de este proceso y que con su apoyo contribuyeron a la realización de los objetivos. Al Cuerpo docente, personal de mantenimiento y compañeros de estudio, con los cuales compartí todo tipo de experiencias a nivel académico y personal.

ROGER DAVID PIMIENTA BARROS

AGRADECIMIENTOS.

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla Saavedra por su orientación, acompañamiento y dirección durante el desarrollo del proyecto, de igual forma por su cordialidad, paciencia, compañerismo y disposición, cualidades con las cuales nos orientó en el proceso y desarrollo de este proyecto, contribuyendo a un gran logro en nuestra formación como ingenieros y a nuestro crecimiento personal.

Al Cuerpo Docente de la Universidad Pontificia Bolivariana en general, porque cada área del conocimiento estudiada en el transcurso de la carrera tuvo un aporte a nuestra formación como profesionales con sentido humano.

Al Cuerpo Docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica, por compartir sus conocimientos y experiencias de vida las cuales contribuyeron de manera activa en nuestro aprendizaje.

A los proveedores y contratistas involucrados en la ejecución del proyecto en cada una de sus fases.

A la ingeniera Leidy Johanna Olarte Silva por su especial colaboración, tiempo y paciencia para con nosotros.

A los ingenieros Gerardo Porras director del INM y al ingeniero William Cortés del ICP, por permitirnos enriquecer nuestros conocimientos y brindarnos información valiosa en el área de la metrología, contribuyendo en gran medida en el desarrollo del proyecto.

A todos los ingenieros y personal de mantenimiento de la Universidad Pontificia Bolivariana, que de una u otra forma con su experiencia, consejos y orientación contribuyeron de manera positiva en la ejecución y desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. PRESIÓN.....	2
1.1. DEFINICIÓN:	2
1.2. UNIDADES DE LA VARIABLE PRESIÓN.....	2
1.2.1. Libra Por Pulgada Cuadrada (psi)	3
1.2.2. Atmósfera	3
1.2.3. Torr	3
1.2.4. Baria	4
1.2.5. Kilogramo-Fuerza Por Centímetro Cuadrado o Milímetro De Columna De Agua a 4°C	4
1.3. TIPOS DE PRESIÓN:.....	4
1.3.1. Presión Atmosférica	4
1.3.2. Presión Relativa	4
1.3.3. Presión Absoluta	5
1.3.4. Presión Diferencial	6
1.4. CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS.	6
1.4.1. Instrumentos Mecánicos.....	6
1.4.1.1. Elementos Primarios de Medición Directa	6
1.4.1.2. Elementos Primarios Elásticos Comunes.	10
1.4.2. Elementos Electromecánicos.....	14
1.4.2.1. Medidores de Esfuerzo	14
1.4.2.2. Transductores de Presión Resistivos	15
1.4.2.3. Transductor de Presión Capacitivo:	15
1.4.2.4. Transductor de Presión Magnético:.....	16
1.4.2.5. Transductor Piezoeléctrico:	16
1.5. TRANSMISORES DE PRESIÓN:	17
1.5.1. Transmisores Neumáticos:.....	18
1.5.2. Transmisores Electrónicos:.....	18

1.5.3.	Transmisores Digitales	19
1.5.3.1.	Protocolo HART y Lazo de Control 4 a 20 mA.	20
2.	METROLOGÍA, NORMAS Y ESTÁNDARES.	29
2.1.	METROLOGÍA	29
2.1.1.	Metrología Legal	30
2.1.2.	Metrología Industrial	30
2.1.3.	Metrología Científica.....	30
2.2.	VOCABULARIO METROLÓGICO	30
2.2.1.	Magnitud.....	31
2.2.2.	Unidad de Medida.....	31
2.2.3.	Medición	31
2.2.4.	Dispositivo de Medida	31
2.2.5.	Instrumento de Medida con Dispositivo Indicador	31
2.2.6.	Instrumento de Medida con Dispositivo Visualizador.....	31
2.2.7.	Intervalo de Medidas:	31
2.2.8.	Resolución.....	32
2.2.9.	Transductor de Medida:.....	32
2.2.10.	Patrón de Medidas:	32
2.2.11.	Calibración.....	32
2.2.12.	Ajustar	32
2.2.13.	Ajuste De Cero De Un Sistema De Medida:	32
2.2.14.	Trazabilidad Metrológica:.....	33
2.2.15.	Incertidumbre de Medida:	33
2.2.16.	Repetibilidad de Medida	33
2.3.	NORMA:	33
2.3.1.	Tipos de Norma:.....	34
2.3.2.	Normas Aplicadas en el Diseño del Banco.	34
2.4.	NORMALIZACIÓN.	39
2.4.1.	Organismos Internacionales de Normalización y Estandarización.	39
2.4.2.	Organismos Regionales de Normalización y Estandarización.....	40
2.4.3.	Organizaciones Privadas de Normalización y Estandarización.	40

2.4.4.	Organismo Nacional de Normalización y estandarización.	40
2.5.	ESTANDARIZACIÓN.	41
2.6.	ACREDITACIÓN.	41
2.6.1.	Organismos Internacionales de Acreditación.	41
2.6.2.	Organismo Nacional de Acreditación.	42
2.7.	CERTIFICACIÓN.	43
3.	DISEÑO E INGENIERÍA DE DETALLE.	44
3.1.	ZONA DE TRABAJO.	44
3.1.1.	Parámetros del Laboratorio de Instrumentación.	45
3.1.1.1.	Transmisor Indicador de Temperatura y Humedad Relativa.	45
3.1.1.2.	Reloj.	46
3.2.	SELECCIÓN DE EQUIPOS.	48
3.2.1.	Transmisor Smar LD291.	48
3.2.2.	Transmisor Smar LD301.	50
3.2.3.	Manómetros.	51
3.2.4.	Tubo de PFA.	53
3.2.5.	Válvulas de Aguja.	54
3.2.6.	Reguladores de Presión.	55
3.2.7.	Filtro Regulador de Presión.	56
3.2.8.	Suministros de Aire.	57
3.2.8.1.	Sistema de Suministro de Aire de Instrumentos Edificio K.	57
3.2.8.2.	Bomba Manual Fluke 700 PTPK.	58
3.2.9.	Racor Recto Metálico.	59
3.2.10.	Fuente Externa de 24 Vdc.	60
3.2.11.	Calibrador de Procesos Fluke 726.	61
3.2.12.	Módulo de Presión Fluke 700p06.	61
3.2.13.	Interfaz USB de Calibración Vía HART DDCON100.	62
3.3.	DISEÑO DEL MÓDULO Y CIRCUITO BASICO DE ENSAYO.	63
3.3.1.	Criterios de Diseño.	65
3.3.1.1.	Condiciones Ambientales.	65
3.3.1.2.	Equipos y Dispositivos de Medición.	65

3.3.1.3.	Aspecto Ergonómico del Diseño.	67
3.3.2.	Tipos de Prueba.....	67
3.3.2.1.	Pruebas de Repetibilidad e Histéresis.	67
3.3.2.2.	Preoload.	67
3.3.2.3.	Prueba de Rstanqueidad.	67
3.3.2.4.	Pruebas de Ajuste y Medición Utilizando el Lazo de 4 a 20 mA con Protocolo HART.	68
3.3.3.	Diseño Mecánico del Módulo.	68
3.4.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	70
3.4.1.	NI 9203, Modulo de Entradas de Corriente Analogica de 8 canales de 16 Bits, ± 20 mA, 200 ks/s	70
3.4.2.	NI CDAQ-9174, Chasis NI COMPACTDAQ USB 4 Ranuras.	71
3.4.3.	Inspiron One 2330 con Energy Star 5.2.	72
3.4.4.	Cotización del Sistema de Adquisición de Datos	73
4.	MANUAL Y GUÍA DE LABORATORIO.	74
4.1.	MANUAL DEL CALIBRADOR DE PROCESO 726 FLUKE + MÓDULO 700P06.....	74
4.1.1.	Calibrador de Proceso 726 Fluke.	74
4.1.1.1.	Funcionamiento Básico:	78
4.1.1.2.	Utilización del Modo Measure Medición de Parámetros Eléctricos en la Parte Superior de la Pantalla	79
4.1.1.3.	Medición de Corriente con Alimentación de Bucle.	80
4.1.1.4.	Medición de Parámetros Eléctricos en la Parte Inferior de la Pantalla.....	80
4.1.1.5.	Medición de Presión.....	81
4.1.1.6.	Puesta a Cero con Módulos de Presión Absoluta.	83
4.1.1.7.	Utilización del Modo Source.....	84
4.1.1.8.	Fuente de Corriente de 4 a 20 mA.	84
4.1.1.9.	Simulación de un Transmisor de 4 a 20 mA.....	84
4.1.1.10.	Fuente de Otros Parámetros Eléctricos.	85
4.1.1.11.	Fuente de Presión.....	86
4.1.1.12.	Calibración de un Transmisor de Presión.	87
4.1.1.13.	Calibración de un Dispositivo I/P.....	88
4.2.	MÓDULO DE PRESIÓN FLUKE SERIE 700.....	89
4.3.	GUÍA DE LABORATORIO DEL MÓDULO DE PRESIÓN.	90

4.3.1. Objetivos.....	91
4.3.2. Procedimiento.....	91
4.3.3. Resultados.....	99
4.3.4. Conclusiones y Recomendaciones Sobre la Práctica.	99
RECOMENDACIONES	100
CONCLUSIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros en la norma 17025	47
Tabla 2. Cotización Sistema de Adquisición de datos	73
Tabla 3. Resumen funciones de fuente y medición	75
Tabla 4. Parámetros de medida para presión	75
Tabla 5. Función de teclas a	77
Tabla 6. Función de teclas b	77
Tabla 7. Especificaciones funcionamiento módulo 700P06.....	90
Tabla 8. Datos de Ascenso-Descenso de la Presión.....	98

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución en una superficie	2
Figura 2. Clases de presión	5
Figura 3. Experimento de Torricelli	7
Figura 4. Manómetro de tubo en u	8
Figura 5. Manómetro de tubo inclinado	8
Figura 6. Manómetro de tubo inclinado	9
Figura 7. Manómetros de campana. (a) Líquido sellado, (b) Presión diferencial	10
Figura 8. Tubo Bourdon	11
Figura 9. Tubo Bourdon en espiral	11
Figura 10. Elemento helicoidal	12
Figura 11. Diafragma plano y ondulado	13
Figura 12. Diafragmas	13
Figura 13. Fuelle	13
Figura 14. Galga extensiométrica	14
Figura 15. Transductor resistivo	15
Figura 16. Transductor capacitivo	15
Figura 17. Transductor magnético	16
Figura 18. Transductor piezoeléctrico	17
Figura 19. Evolución de las señales	17
Figura 20. Transmisor neumático	18
Figura 21. Transmisores electrónicos	19
Figura 22. Señal electrónica de 4 a 20 mA cc o 1 a 5Vdc	19
Figura 23. Comunicación punto a punto	21
Figura 24. Modulación HART, señal digital sobre la analógica de 4 a 20 mA	22
Figura 25. Dos canales de comunicación	27
Figura 26. Conexión de dos maestros (primario y secundario) y un esclavo	27
Figura 27. Configuración Multipunto	28
Figura 28. Evidencia visitas a laboratorios	29
Figura 29. Manómetro de pistón	37
Figura 30. Transmisor de temperatura y humedad	46
Figura 31. Reloj instalado en el laboratorio	47
Figura 32. Imagen izquierda, transmisor Smar LD291, Imagen	

derecha, Renderizado del transmisor LD291.....	48
Figura 33. Celdas capacitivas.....	49
Figura 34. Imagen izquierda, transmisor de presión diferencial LD 301, Imagen derecha, renderizado transmisor de presión diferencial LD 301	50
Figura 35. Imagen izquierda, manómetros swagelok, Imagen derecha, renderizado de un manómetro	52
Figura 36. Mangueras y tubos flexibles, material PFA	53
Figura 37. Imagen izquierda, válvula de aguja con bonete integral, Imagen derecha, renderizado válvula de aguja	54
Figura 38. Coeficiente de caudal, válvula de aguja con bonete integral.	55
Figura 39. Imagen izquierda, renderizado de un regulador de presión, Imagen derecha, regulador de diafragma para servicio general	55
Figura 40. Filtro regulador NORGREN	57
Figura 41. Esquema básico del sistema de suministro de aire de instrumentos, edificio K	58
Figura 42. Imagen izquierda, bomba Fluke 700 PTPK, Imagen derecha renderizado bomba Fluke 700 PTPK.....	59
Figura 43. Renderizado final de un racor recto en acero inoxidable	59
Figura 44. Fuente externa de 24 Vdc, EBCHQ, LP1100D-24M	60
Figura 45. Imagen Izquierda, Calibrador de procesos Fluke 726, Imagen derecha, renderizado calibrador de procesos 726	61
Figura 46. Módulo de presión Fluke 700P06	62
Figura 47. Modem HART DDCON100	62
Figura 48. Operaciones para diseño de sólidos, SolidWorks	68
Figura 49. Herramientas de croquizado, tomada del software SolidWorks	69
Figura 50. Renderizado final del módulo de presión	69
Figura 51. Módulo de adquisición de datos, National Instrument NI 9203	71
Figura 52. NI cDAQ-9174, Chasis NI CompactDAQ USB 4 Ranuras.....	71
Figura 53. Ordenador Inspiron One 2330 con Energy Star 5.2	72
Figura 54. Calibrador multifuncional de procesos, Fluke 726.....	74
Figura 55. Pantalla calibrador de procesos Fluke 726	75
Figura 56. Conectores y terminales, Fluke 726.....	76
Figura 57. Teclas.....	76
Figura 58. Conexión para generar y medir una misma tensión	79
Figura 59. Conexión para medir tensión y corriente.....	79
Figura 60. Conexión para medir corriente y Suministrar alimentación	

de lazo	80
Figura 61. Conexión para medir parámetros eléctricos, Parte inferior de la pantalla.....	81
Figura 62. Módulos de presión Fluke 700	82
Figura 63. Conexión de modulo para medir presión	83
Figura 64. Conexión para simular transmisor de señal 4 a 20 mA	85
Figura 65. Conexión como fuente de parámetros eléctricos	86
Figura 66. Conexión de bomba como fuente calibradora.....	87
Figura 67. Conexión para calibración de transmisor corriente a presión.....	88
Figura 68. Módulos de presión Fluke serie 700	89
Figura 69. Estudiantes de postgrado trabajando con el modulo de presión relativa	90
Figura 70. Bomba de presión Fluke 700 LTP.....	91
Figura 71. Circuito básico de presión.....	92
Figura 72. Conexión eléctrica para implementar lazo 4 a 20 mA con protocolo HART.....	93
Figura 73. Escala de PRELOAD.....	94
Figura 74. Verificar conexión	95
Figura 75. Verificar auto-poll.....	95
Figura 76. Opciones para búsqueda de equipos	96
Figura 77. Menú de ajuste	97
Figura 78. Graficas de repetibilidad e histéresis	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Certificado de calibración módulo de presión Fluke 700P06, emitido por fabricante.

Anexo B. Certificado de calibración transmisor de presión diferencial Smar LD291, emitido por fabricante.

Anexo C. Reporte de calibración del calibrador de procesos Fluke 726, emitido por fabricante.

Anexo D. Datos del transmisor de temperatura y humedad Autonics.

Anexo E. P&ID propuesto

Anexo F. Cotización computador DELL, Tabla de precios para compra de accesorios y equipos.

Anexo G. Planimetría del diseño.

Anexo H. Imágenes, diseños y renderizados.

GLOSARIO

CAD: diseño asistido por computadora.

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

GTC: Guía Técnica Colombiana, emitida por el ICONTEC.

HART: (Highway Addressable Remote Transducer), Transductor Remoto Direccional 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 basa la construcción de la manguera tubo marca Swagelok.

Renderizado: es un término usado en jerga informática para referirse al proceso de generar una imagen o vídeo mediante el cálculo de iluminación GL partiendo de un modelo en 3D y específicamente en este caso se refiere a las imágenes generadas en base a los diseños realizados en la herramienta SolidWorks. [59]

Repetibilidad: manual, alimentado por baterías que mide y suministra parámetros eléctricos y físicos. Su objetivo es medir, calibrar y comprobar casi cualquier variable de procesos.[61]

Solidwoks: es un programa de diseño asistido por computadora, permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. [60]

Tag: Dirección o identificación de instrumento.

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]

Trazabilidad: Es la propiedad del resultado de una medida o del valor de un estándar donde éste pueda estar relacionado con referencias especificadas. [35]

RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: DISEÑO DE UN MODULO 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.

**AUTORES: MAURER RODRÍGUEZ QUINTERO.
ROGER DAVID PIMIENTA BARROS.**

FACULTAD: INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA.

Se realizó el diseño y montaje de un módulo para la medición de la variable presión, la cual se hizo por medio de equipos mecánicos entre los que se encuentran, manómetros de diferentes escalas, bombas manuales que permite el suministro de aire y válvulas reguladoras; también se utilizaron equipos eléctricos, entre estos un calibrador de procesos, un transmisor indicador de presión relativa y un transmisor indicador de presión diferencial; los transmisores permiten realizar supervisión y configuración remota de datos por medio de un lazo de corriente 4-20 mA sobre la cual modula el protocolo HART.

Para el módulo, se generó una guía que brinda toda la información para realizar una conexión con el protocolo HART y realizar procedimientos de medición; al implementar esta comunicación se pueden manipular características y datos de uno o más transmisores inteligentes desde un ordenador, y al mismo tiempo obtener información de las variables que podrían ser tomadas directamente de un proceso. La guía, también brinda información que permite realizar una calibración a los equipos que se encuentran en el lazo de presión, para esta actividad es tomado como patrón el calibrador de procesos, ya que es un equipo que cuenta con las características de fabricación que garantizan cierta confianza en la medida de la variable presión.

El diseño preliminar del módulo de presión fue realizado con ayuda de la herramienta SolidWorks, la cual brinda valiosas ventajas al permitir realizar esquemas de tipo CAD en 3D, de los equipos y accesorios utilizados en el diseño de manera muy detallada.

PALABRAS CLAVE: Metrología, presión, instrumentos, sensores, calibración, precisión, medición, Tubo Bourdon, diafragma, fuelle.

V°B° DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO.

ABSTRACT OF THESIS PROJECT

TÍTULO: DESIGN OF A TEST MODULE FOR MEASURING THE VARIABLE PRESSURE, WITH THE IMPLEMENTATION OF A RELATIVE PRESSURE BASIC CIRCUIT TO THE UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA'S INSTRUMENTATION LABORATORY.

**AUTHOR: MAURER RODRÍGUEZ QUINTERO.
ROGER DAVID PIMIENTA BARROS.**

DEPARTAMENT: ELECTRONIC ENGINEERING.

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA.

Was performed the design and installation of a module for measuring the pressure variable, which was done through mechanical equipment among which are found, manometers of different scales, hand pumps allowing air supply and control valves; also electrical equipment was used, among these a processes feeler, a transmitter relative pressure indicator and a differential pressure transmitter indicator, the transmitters allow remote monitoring and configuration data through a 40-20 mA current loop that modulates the HART protocol.

For the module was generated a guide that provides all the information to make a connection with the HART protocol and perform measuring procedures; when implement this communication can be manipulated data characteristics and one or more smart transmitters from a computer, and at the same time information of the variables that could be taken directly from a process. The guide also provides information that allows calibrating the equipment found in the pressure loop, for this activity is taken as principal standard the calibrator processes, as it is an equipment with manufacturing specifications that guarantee certain confidence in the outcome measure of the variable pressure.

The preliminary design pressure module was made by using the SolidWorks tool, which provides valuable benefits when enable sketching 3D CAD type of equipment and accessories used during the design in a very detailed manner.

KEYWORDS: Metrology, pressure, instruments, sensors, calibration, accuracy, measurement, Bourdon tube, diaphragm, bellows.

V°B° THESIS DIRECTOR

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento del sector industrial y las dificultades que se generan con este acontecimiento, se reflejan en la necesidad de implementar nuevas herramientas y tecnologías, con el fin de brindar soluciones que permitan gozar de sus productos sin percibir esas dificultades y de esta forma poder satisfacer las exigencias en las operaciones industriales de una manera eficiente. Las condiciones del mercado, en búsqueda de productos de excelente calidad, es una de las principales causas de este notorio crecimiento en el área industrial, quien impulsa constantemente a los diseñadores a innovar y avanzar en la optimización de procesos, obteniendo con esto, herramientas que permiten reducir las limitaciones de operación en los dispositivos y diseñar estrategias de control.

Teniendo en cuenta lo mencionado, cabe resaltar que, para obtener los mejores procesos de producción en una empresa no es necesario solamente contar con las mejores herramientas y tecnologías de producción, sino que, esto debe ser complementado por un excelente recurso humano, este grupo de personas debe contar con una muy buena preparación, que les permita abordar cada una de las situaciones en su área de producción. Para esto deben contar con un proceso de formación que les brinde conocimiento y les permita experimentar situaciones muy similares a las que pueda encontrar en estos entornos.

Es por esto que en la Universidad Pontificia Bolivariana se realiza el diseño de un módulo de prueba de la variable presión en el laboratorio de instrumentación, con el cual se pretende generar un espacio que no solo brinde conocimientos, si no que permita también obtener experiencia a sus estudiantes de áreas afines con el manejo de esta variable, brindándoles así, herramientas que sean de mucha utilidad a la hora tomar decisiones e incluso tener algunos criterios que le permitan realizar diseños de procesos en base a esta área; teniendo con esto, egresados preparados para conformar el capital humano de empresas e industrias, que demandan de personas capacitadas para garantizar el éxito de su producción.

1. PRESIÓN.

1.1. DEFINICIÓN:

Es una magnitud que permite apreciar la distribución de la fuerza aplicada sobre un espacio, en relación al área de una superficie; la medida de esta variable se obtiene entonces a partir de la siguiente relación: [31]

$$P = \frac{F[N]}{A[m^2]} \quad \text{Ec.1}$$

La presión es generada por la interacción entre una superficie y sustancias en estado gaseoso o estado líquido, cabe resaltar que los sólidos no generan presión, estos generan solo fuerzas, ya que no tienen la capacidad de distribuirse de manera uniforme. [31]

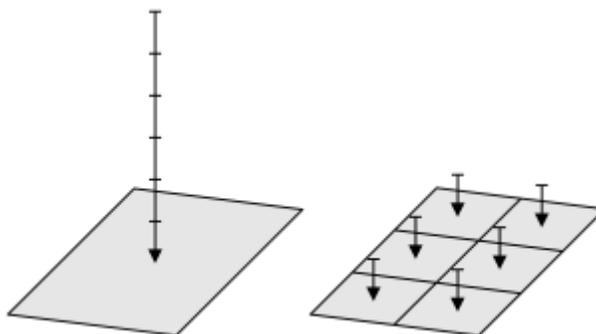


Figura 1. Distribución en una superficie [31]

La figura 1, ilustra el concepto de distribución en una superficie, en esta se aprecia como para cada unidad de intensidad se proporciona una unidad de área. Brindando una idea de la distribución de la fuerza que generara una presión. [31]

1.2. UNIDADES DE LA VARIABLE PRESIÓN.

La unidad oficial para expresar las medidas de presión es el pascal, quien hace referencia a un Newton aplicado sobre un metro cuadrado y quien en el SI equivale a $1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$. Esta variable se expresa también en otras unidades auxiliares teniendo en cuenta la aplicación y la magnitud con la que se trabaja, a continuación se presentan algunas de esas unidades en las que se encuentra con frecuencia representada esta variable. [31]

1.2.1. Libra por Pulgada Cuadrada (psi):

En ingles pounds per square inch (psi), esta unidad hace parte del sistema anglosajón e indica la presión que ejercen unas libras de fuerza sobre una superficie de una pulgada cuadrada.

Esta unidad tiene dos derivaciones que son el psia y el psig, difieren en que los instrumentos que miden presión en psia tienen como cero o referencia el cero absoluto o ausencia de presión y los instrumentos que miden presión en psig nos dan una lectura de una presión relativa, en donde el cero es la presión atmosférica, la mayoría de manómetros que se encuentran en el mercado y alguno elementos para medir presión realizan sus medidas en base a esta última, indicando una presión de cero psi cuando están abierto a la atmosfera. [32]

$$\begin{aligned}1 \text{ psi} &= 68,948 \text{ kPa} \\14,7 \text{ psi} &= 1 \text{ atm}\end{aligned}$$

1.2.2. Atmosfera:

La atmosfera ejerce una presión sobre la tierra, la cual al nivel del mar se denomina presión atmosférica estándar, se expresa como atm y que se puede obtener mediante el experimento de Torricelli al nivel del mar quien genera una medida de 760 mmHg, obteniendo de la siguiente relación: [33]

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ kPa}$$

1.2.3. Torr:

esta unidad de medida de presión que lleva este nombre en honor a Torricelli, quien realizo un experimento que permite medir la presión en base al desplazamiento de mercurio en una columna demarcada, la cual es sumergida en un recipiente con el mismo liquido (Hg), obteniendo al nivel del mar, a una temperatura de cero grados Celsius y una fuerza gravitacional de $9.8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ una medida de 760mmHg en una columna de 1m. [33]

$$\begin{aligned}760 \text{ Torr} &= 760 \text{ mmHg} \\1 \text{ Torr} &= 133,322 \text{ Pa}\end{aligned}$$

1.2.4. Baria:

Es la unidad de presión en el sistema cegesimal y es la presión que ejerce la fuerza de una dina sobre una superficie de un centímetro cuadrado.

En muchos textos y aplicaciones es muy común encontrar unidades auxiliares a esta, que facilitan la manipulación de la variable presión, entre las cuales encontramos el bar y el milibar, quienes se encuentran relacionadas de la siguiente manera: [34].

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

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

$$1\text{mbar} = 1000\text{baria} = 1\text{hPa (hectopascal)}$$

1.2.5. kilogramo-Fuerza por Centímetro Cuadrado o Milímetro de Columna de Agua a 4 °C:

Es la unidad de presión en el sistema técnico. En donde el peso específico del agua es la unidad a una temperatura de cuatro grados Celsius. [1][6]

$$\underline{\text{kgf}} / \text{cm}^2 = 1\text{mmH}_2\text{O}$$

Esta unidad indica la presión que ejerce un kilogramo fuerza en una superficie de un metro cuadrado; el expresar esta unidad en milímetros de agua resulta muy práctico para algunas aplicaciones como son en las que se utilizan manómetros de agua por ejemplo. [35]

1.3. TIPOS DE PRESIÓN:

1.3.1. Presión Atmosférica:

Es la presión que ejerce la atmosfera sobre la tierra la cual es necesaria para preservar la vida en esta. Es medida mediante un barómetro y se toma como referencia la medida tomada al nivel del mar, la cual es próxima a 760 mmHg. [1][6]

1.3.2. Presión Relativa:

Es la presión que se mide mediante un instrumento que permite encontrar diferencias entre la presión atmosférica y una presión desconocida. Hay que señalar que el aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta, respectivamente, la presión leída. En el caso en el que la presión

absoluta es menor que la atmosférica, la presión relativa será de signo negativo, lo que es conocido en ocasiones como **vacío**. [1][6]

1.3.3. Presión Absoluta:

Es la presión medida con referencia al vacío perfecto. También se obtiene sumando la presión relativa indicada por un elemento de medida con la presión atmosférica. [1][6]

$$P_{absoluta} = P_{manometrica} + P_{atmosferica} \quad \text{Ec.2}$$

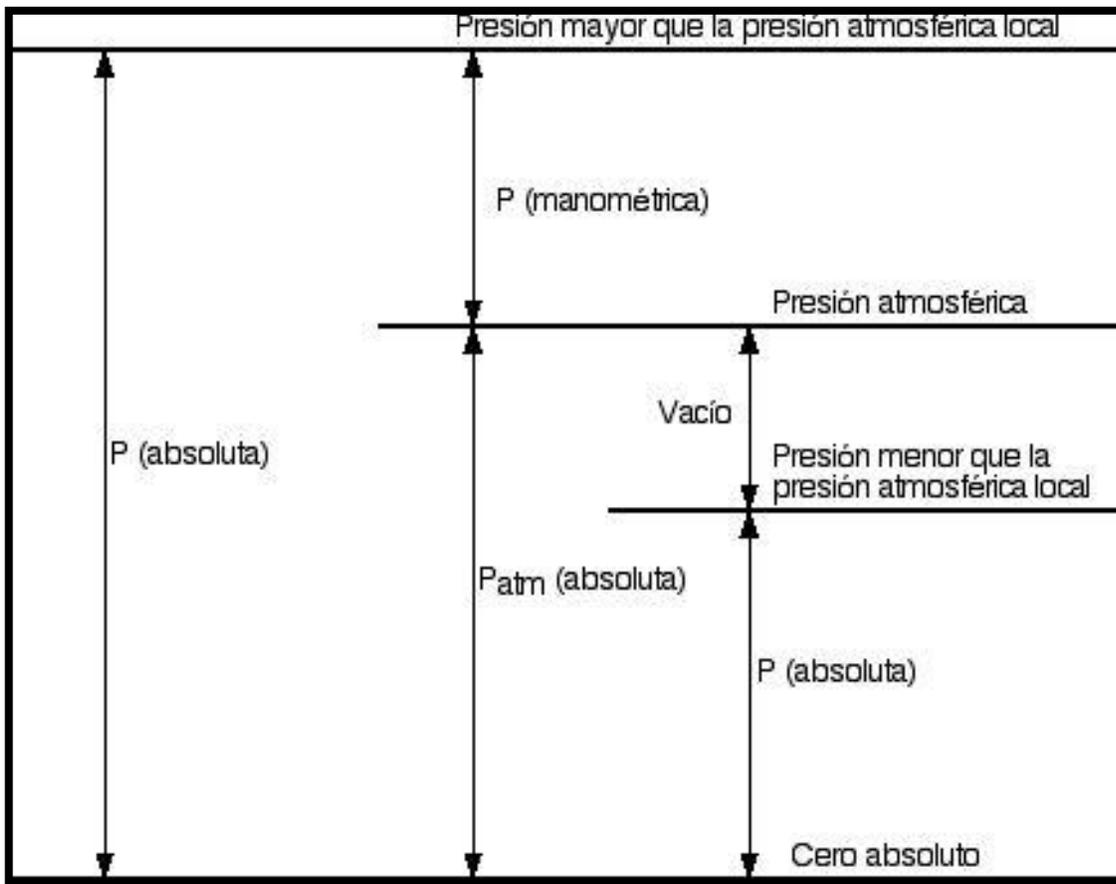


Figura 2. Clases de Presión [2]

1.3.4. Presión Diferencial:

Como su nombre lo indica es el resultado de la diferencia de dos medidas de presiones que tienen el mismo cero de referencia, el vacío es la diferencia de Presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta; es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica. [1][6]

1.4. CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS.

A la hora de querer efectuar medidas de presión se encuentran en el mercado gran variedad de instrumentos que además de medir nos permiten registrar, indicar, controlar entre otras acciones; estos se encuentran clasificados de la siguiente manera:

1.4.1. Instrumentos Mecánicos:

Se encuentran divididos en dos grupos de acuerdo a su principio de funcionamiento.

1.4.1.1. Elementos Primarios de Medición Directa:

Realiza la medida al hacer una comparación entre la presión aplicada y una ejercida por un líquido con densidad conocida, quien genera una altura proporcional en un recipiente; entre estos tenemos:

a. Barómetro de Cubeta:

Es un mecanismo que permite medir la presión atmosférica. Se realiza en base al experimento de Torricelli, físico y matemático quien en 1643 obtuvo la medida de la presión atmosférica estándar utilizada en la actualidad, al llenar un tubo de 1m de largo cerrado en un extremo con mercurio e invirtiéndolo sobre una cubeta llena de este mismo líquido, como se presenta en la figura 3, observando cómo baja el nivel de mercurio en el tubo hasta alcanzar un altura de 0.76m aproximadamente a una temperatura de cero grados Celsius y una fuerza gravitacional de $9.8066 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, Observándose que el nivel de mercurio en el tubo es directamente proporcional a la presión del exterior o en este caso a la presión atmosférica. [3]

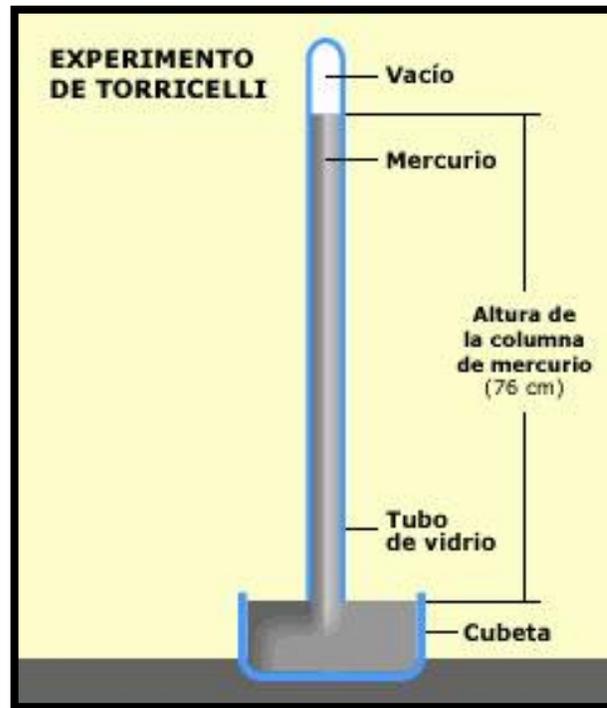


Figura 3. Experimento de Torricelli [4]

b. Manómetro de Tubo en U:

Es un instrumento que permite medir presión diferencial, consta de un tubo de vidrio con forma de U en donde se vierte una cantidad específica de líquido con una densidad conocida.

Para realizar una medición se conecta uno de sus extremos a la zona con presión desconocida y el otro extremo a una presión conocida o se puede dejar libre a la atmosfera, generando una variación del líquido en el tubo que permite obtener una medida en base a una escala, la densidad del líquido y las presiones en los extremos.

De este tipo de experimentos surgieron las unidades de presión en base a las unidades de longitud y líquidos como el milímetro de mercurio (mmHg), milímetro de agua (mmH₂O), pulgadas de mercurio (pulgadas de Hg), entre otras.[5]

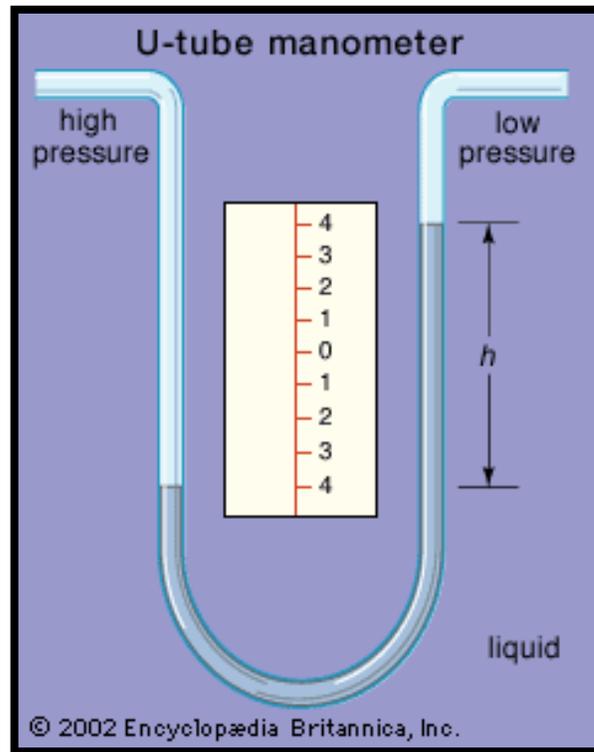


Figura 4. Manómetro de tubo en u [8]

c. Manómetro de Tubo Inclinado:

Permite realizar mediciones de presiones diferenciales pequeñas, está conformado por dos ramas de las cuales una tiene una inclinación que permite realizar mediciones por medio de la variación del nivel de un líquido en esta rama teniendo en cuenta que $h=L\text{sen}(\theta)$ para el caso planteado en la figura 5. Relación que permite plantear una escala como la que se puede ver en el tubo inclinado de la figura 6. [7]

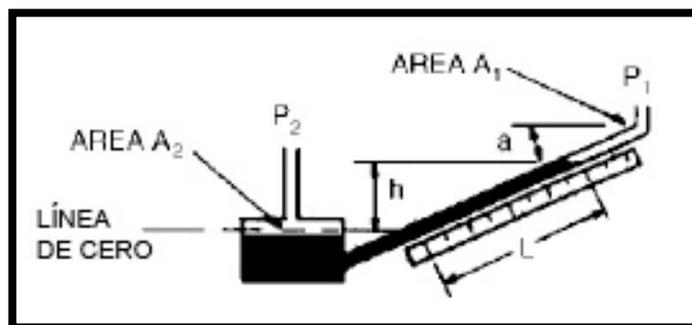


Figura 5. Manómetro de tubo inclinado [7]



Figura 6. Manómetro de tubo inclinado [53]

d. Manómetro de Campana:

Este mecanismo permite medir presión diferencial, cuenta principalmente con dos recipientes, en donde uno con mayor dimensión almacena determinado líquido sobre el cual actúa la presión atmosférica o una presión conocida si está cerrado; como se aprecia en las siguientes imágenes; también cuenta con un conducto o vía que permite aplicar presión en el espacio entre el líquido y las paredes del recipiente con menor dimensión, quien esta introducido parcialmente en forma de campana; el movimiento vertical de esta campana es proporcional al diferencial de presión. Para un balance estático se puede utilizar la siguiente relación: [7]

$$P_2 - P_1 = (K_r * h) / A \quad \text{Ec.2}$$

$P_2 - P_1$: Diferencial de presión.

K_r : Constante elástica del resorte.

h : Desplazamiento de la campana.

A : Área del interior de la campana.

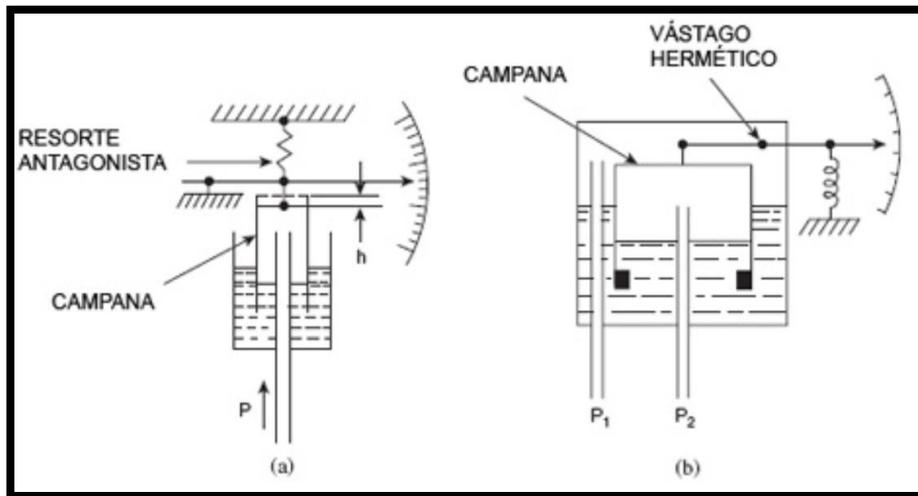


Figura 7. Manómetros de campana. (a) Líquido sellado, (b) Presión diferencial [7]

1.4.1.2. Elementos Primarios Elásticos Comunes.

a. Tubo de Bourdon:

Debe el nombre a su inventor, el ingeniero francés Eugene Bourdon. Este es un dispositivo que tiene un extremo cerrado y otro acoplado a una línea de presión. A medida que el tubo detecta presión se deforma convirtiendo la variable presión en desplazamiento. Así mismo, esta acoplado a un mecanismo de engranajes y una aguja la cual mide dicho desplazamiento en el extremo cerrado. A continuación se presentan los tres diseños de manómetros de tubo de Bourdon más utilizados: [54].

- Tubo Bourdon en C:

Consta de un tubo metálico curvo en forma de C, en donde un extremo permite el suministro de presión a medir y el otro es totalmente sellado, el cual se encuentra conectado a través de un mecanismo de piñones a una aguja que genera una medida de presión directamente sobre una escala relacionada con todo el comportamiento del mecanismo y proporcional a la deformación que genera la presión. [5][9]

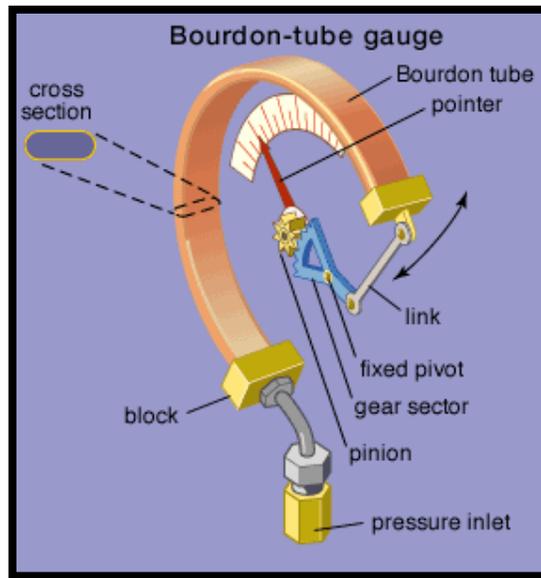


Figura 8. Tubo Bourdon [8]

- Tubo Bourdon en Espiral:

En este mecanismo encontramos un tubo de Bourdon arrollado entre sí en forma de espiral y quien tiene una separación considerable entre sus secciones; separación que varía al aplicar una presión desconocida en el terminal exterior y quien hace que el tubo trate de recuperar su forma recta, lo que genera también una variación en el terminal final o cerrado, el cual se encuentra conectado a un indicador por medio de mecanismos que le brindan un desplazamiento proporcional a la presión. [1][10][9]



Figura 9. Tubo Bourdon en espiral [55]

- Tubo Bourdon en Helicoidal:

En este mecanismo se cuenta con un tubo de Bourdon arrollado en forma de espiral helicoidal, quien al aplicarle una presión en un extremo, tendera a desplazar su extremo final o cerrado, generando el desplazamiento de una aguja en proporción a la presión aplicada por medio de un mecanismo de piñones. [1][10][9]

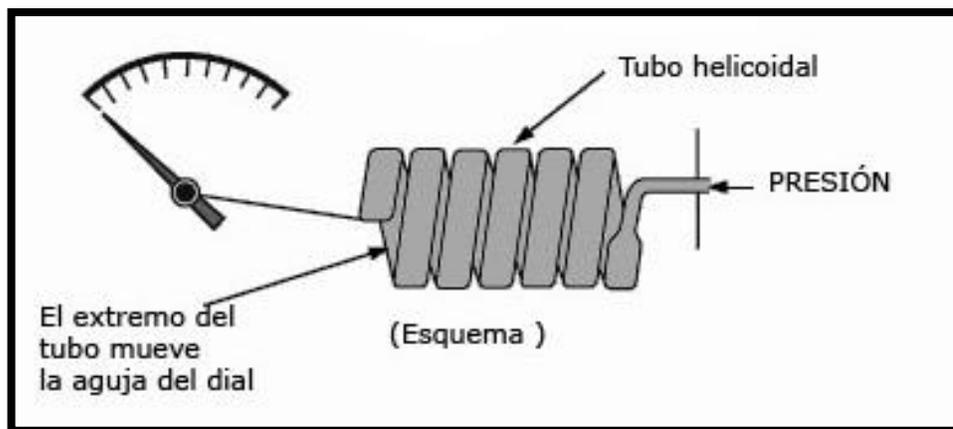


Figura 10. Elemento helicoidal [11]

Al observar los anteriores tubos de Bourdon se aprecia que su principio de funcionamiento se basa en generar medidas entorno a una deflexión que es proporcional a la presión a medir, quien es aplicada en su interior. Los diseños del tubo de Bourdon en espiral y el helicoidal permiten obtener medidas de presiones muy altas y de forma muy precisa. Estos elementos son uno de los instrumentos más utilizados en el manejo de esta variable.

b. Diafragma:

Este elemento consta de uno o varios discos metálicos flexibles y muy comúnmente corrugados, los cuales se encuentra fijos de manera hermética en un conducto como se aprecia en la imagen. Sobre estos discos recae la presión a medir generándoles variaciones o deformaciones que se traducen por medio de un mecanismo en medidas. [7][1]

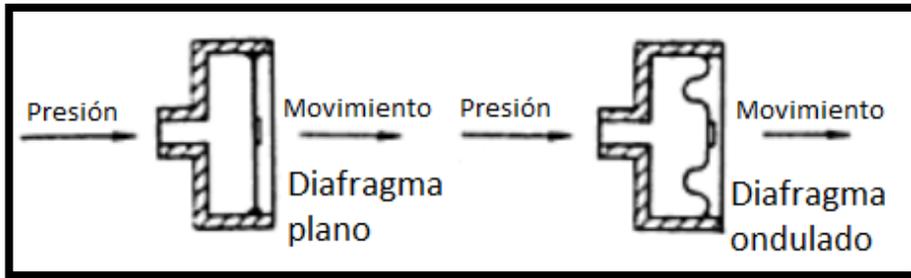


Figura 11. Diafragmas plano y ondulado [56]



Figura 12. Diafragmas [57]

c. Fuelle:

Este elemento lo conforma en principio una pieza flexible axialmente a quien se le aplica la presión a medir, obteniéndose con esto una elongación o contracción que generara una variación en una aguja indicadora que se encuentra conectada a este por un mecanismo. [7][1][5]

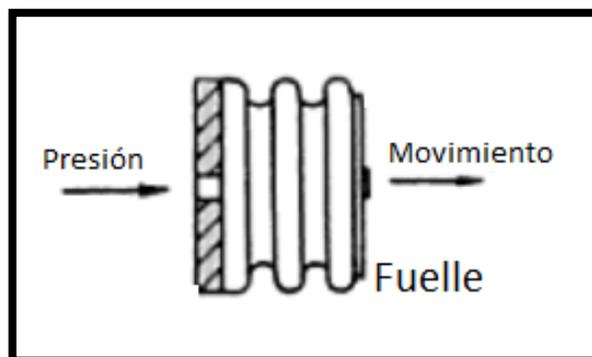


Figura 13. Fuelle [56]

1.4.2. Elementos Electromecánicos:

Son instrumentos que basan su funcionamiento en elementos mecánicos, utilizando un transductor de presión; estos son dispositivos electromecánicos diseñados para captar deformaciones generadas por presión; se componen de membranas flexibles o elementos piezoeléctricos que responden a la variación de presión, estos se complementan con circuitos electrónicos de donde se adquiere una información eléctrica que puede ser enviada a sistemas de adquisición para el almacenamiento, recuperación y visualización; lo que hace a estos transductores una herramienta conveniente y confiable a la hora de medir presión.

1.4.2.1. Medidores de Esfuerzo:

Este instrumento basa su funcionamiento en los sensores mecánicos que utilicen comúnmente diafragma o resortes que actúen como una fuerza de restauración, a quienes se les monta directamente un transductor (**galga extensiométrica**) que genera a partir de un movimiento mecánico una señal eléctrica determinada, en relación a la resistencia generada en este cuando se aplican diferentes rangos de presión, que deforman la superficie de un diafragma por ejemplo. [7][12]

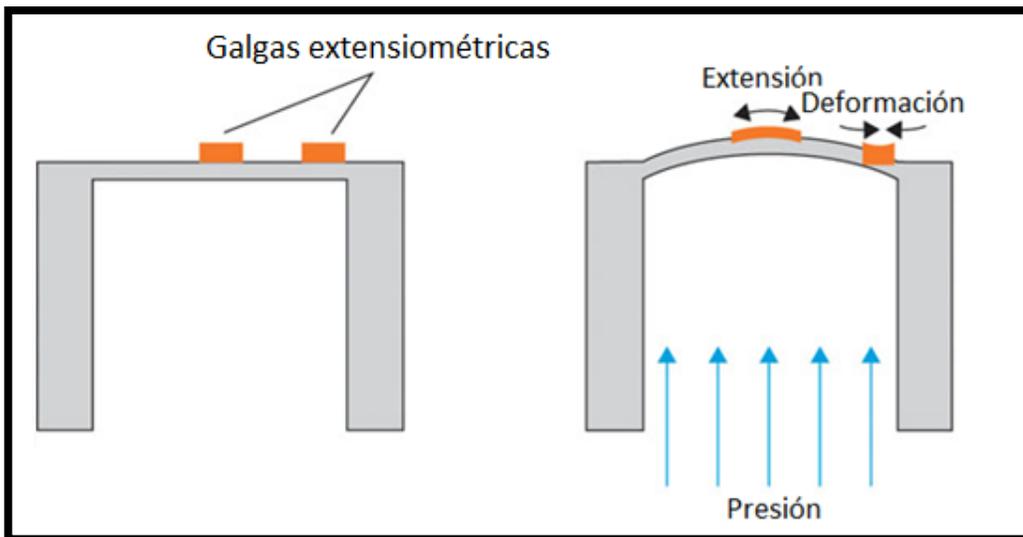


Figura 14. Galga extensiométrica [58]

1.4.2.2. Transductores de Presión Resistivos:

Estos instrumentos operan con elementos elásticos como lo pueden ser un tubo Bourdon, diafragma o fuelle, el cual hace variar la resistencia de un potenciómetro de forma proporcional a la presión a medir, de igual forma como lo hace con la aguja indicadora un manómetro por ejemplo. [7]

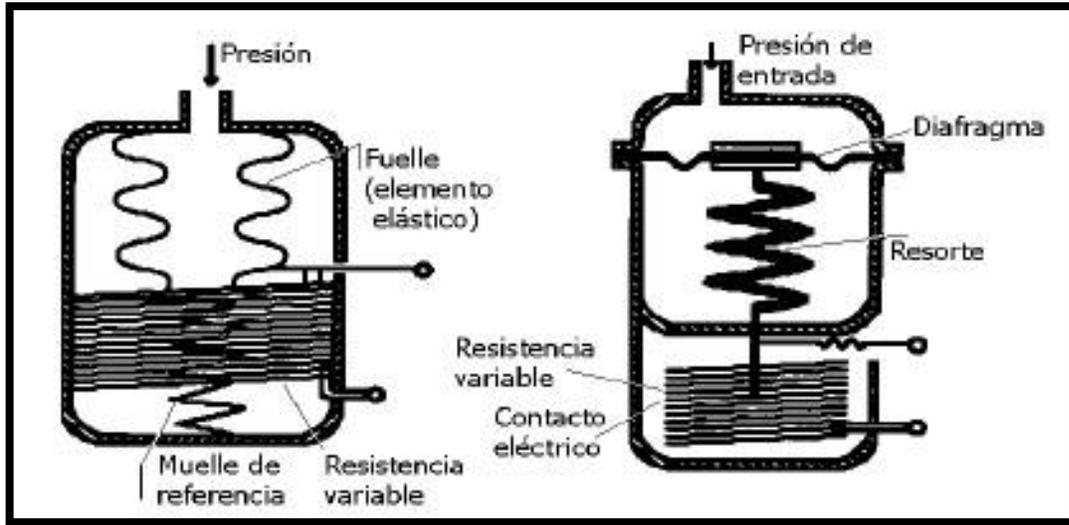


Figura 15. Transductor resistivo [7]

1.4.2.3. Transductor de Presión Capacitivo:

En estos dispositivos el elemento sensor es un diafragma que está en contacto con la presión a medir, en el cual se produce deflexiones que varían la distancia y por ende la capacitancias entre unas placas que crean un condensador; esta variación en el valor capacitivo produce un cambio en la señal de voltaje de un circuito de adquisición que procesa la información y genera una medida. [7][14]

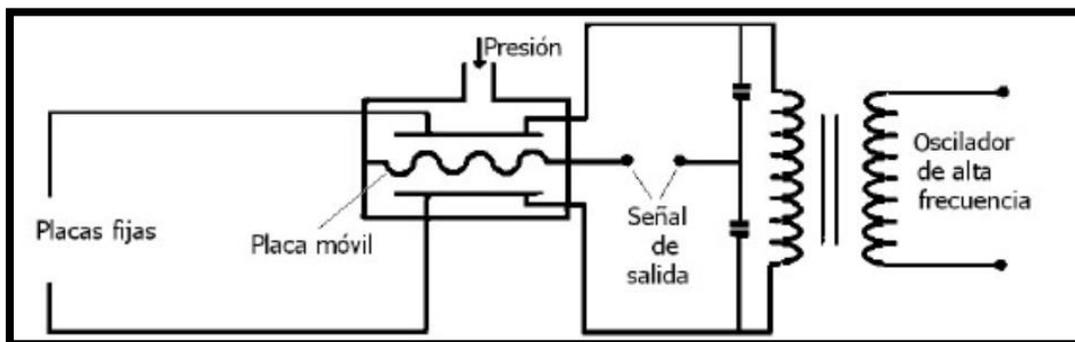


Figura 16. Transductor capacitivo [7]

1.4.2.4. Transductor de Presión Magnético:

También llamado transductor de inductancia variable, este mecanismo utiliza una bobina con un núcleo móvil, el cual está conectado a un elemento elástico (fuelle) que genera una variación del núcleo proporcional con la presión que hará cambiar la inductancia quien permite captar una información eléctrica con la medida de presión. [7][14][13]

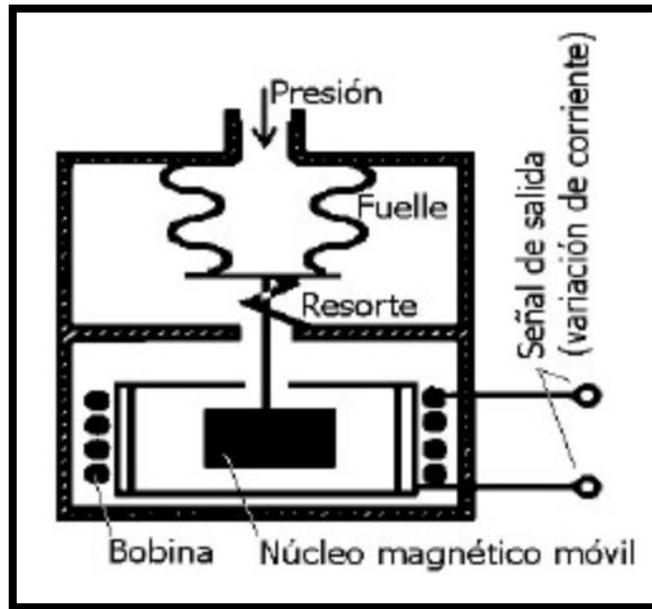


Figura 17. Transductor magnético [7]

1.4.2.5. Transductor Piezoeléctrico:

Basan su funcionamiento en la carga eléctrica generada por algunos materiales al deformar su estructura en proporción a una presión aplicada, la cual se desea medir; esta carga eléctrica es traducida por sistemas o microprocesadores en medidas de presión digitalizada. Los materiales comúnmente utilizados en esta aplicación son el cuarzo y el PZT (cerámica polarizada a base de plomo, zirconio y titanio). [7]

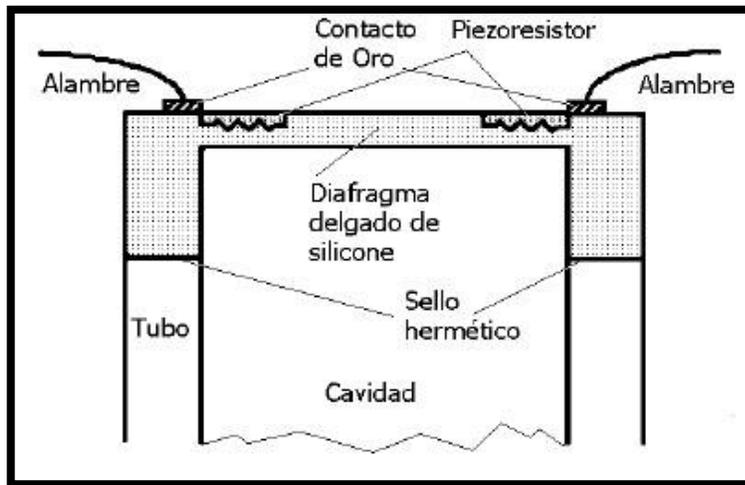


Figura 18. Transductor piezoeléctrico [7]

1.5. TRANSMISORES DE PRESIÓN:

Los transmisores son aquellos instrumentos que captan una variable de procesos a través de un transductor, los que trabajan con la variable presión se encargan de transmitir a distancia la información en forma de señal neumática, electrónica o digital. La señal neumática posee un rango de operación de entre 20 a 100 kPa lo cual equivale a 3 a 15 psi. La señal electrónica estándar es la de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal digital consiste en una serie de impulsos que conforman los bits. [16]

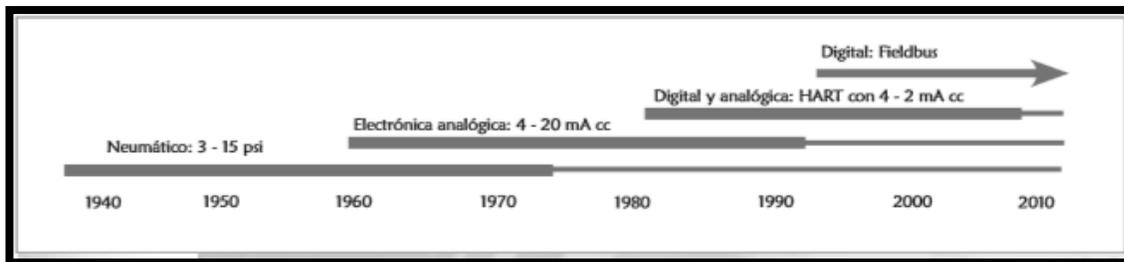


Figura 19. Evolución de las señales [16]

Las señales neumática y electrónica se utilizan cada vez menos, por lo que la digital a entrado en un auge gracias a las ventajas que ofrece, tales como la exactitud, facilidad de comunicaciones y utilización de memoria histórica de las variables de proceso. [16]

La exactitud que se consigue con las diferentes señales de transmisión es:

- $\pm 0,5\%$ en los neumáticos.
- $\pm 0,3\%$ en los electrónicos.
- $\pm 0,15\%$ en los “inteligentes” con señal de salida de 4 a 20 mA c.c
- $\pm 0,1\%$ en los digitales. [16]

1.5.1. Transmisores Neumáticos:

Este tipo de transmisores se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o fuerzas, convierte el movimiento del elemento primario de medición en un sensor neumática bajo el estándar de 20 a 100 kPa o 3 a 15 psi. [16]

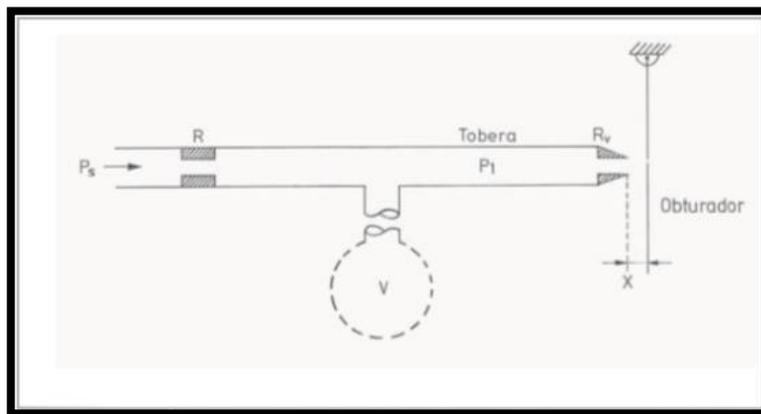


Figura 20. Transmisor neumático [16]

Los transmisores neumáticos, al tener muy pequeño el diámetro de la tobera, normalmente en el orden de 0,1 a 0,2 mm, son susceptibles de mal funcionamiento, debido a impurezas y partículas de aceite o polvo que puedan tapar la tobera. Este problema de mantenimiento unido al hecho de que no pueden guardar las señales de planta, hace que se utilicen cada vez menos. [16]

1.5.2. Transmisores Electrónicos:

Están basados en un principio de operación inductivo, o utilizando transformadores diferenciales o un circuito de puente de Wheatstone. También se los pueden encontrar algunos que emplean una barra de equilibrio de fuerzas. Su principal función es convertir la señal variable, en este caso la presión en una señal eléctrica de 4 a 20 mA de corriente continua. [16]

Dado que también es complicado guardar este tipo de señales, la industria igualmente ha ido mermando su uso. [16]

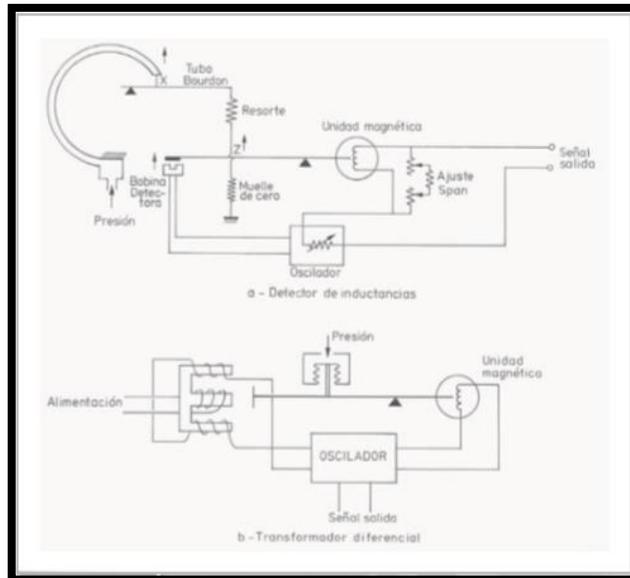


Figura 21. Transmisores electrónicos [16]

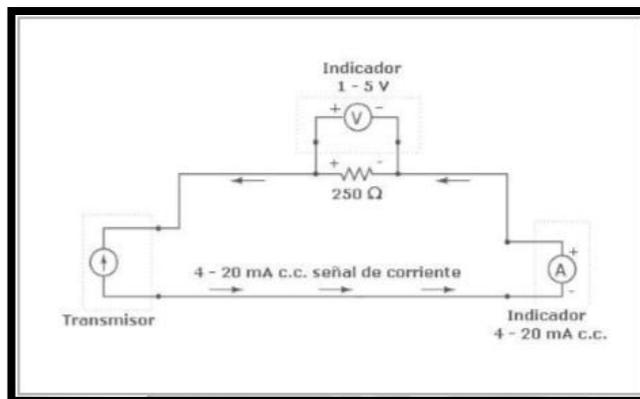


Figura 22. Señal electrónica de 4 a 20 mA cc o 1 a 5Vdc [16]

1.5.3. Transmisores Digitales:

Las señales digitales están formadas por una serie de impulsos en forma de bits, utilizando el sistema binario. Si la señal es de 16 bits quiere decir que puede manejar 16 señales binarias, siendo el mayor número binario de 16 cifras:

$$1111111111111111 = 1 + 1*2 + 1*2^2 + 1*2^3 + \dots + 1*2^{15} = 65536$$

La exactitud de la señal digital de 16 bits es: 0,0015%

En el valor anterior no se considera la exactitud del sensor de la variable. El término “inteligente” (smart) indica que el instrumento es capaz de realizar funciones adicionales a la de la simple transmisión de la señal del proceso. Estas funciones adicionales pueden ser el cambio automático del campo de medida, compensación de las variaciones de temperatura y tensiones de referencia de los transmisores y autoajuste desde el panel de control, grabación de datos históricos, mantenimiento, rangeabilidad, autocalibración por variaciones del proceso, autodiagnóstico, mantenimiento, comunicador portátil.

La exactitud de los instrumentos digitales puede alcanzar $\pm 0,1\%$. Mediante el bus de campo es posible transmitir digitalmente en serie las señales de los transmisores al sistema de comunicaciones y a los controladores (control distribuido, controladores programables, bloques de control). De este modo se mejora la exactitud de los datos y la fiabilidad, se reduce la mano de obra de cableado y es posible disponer de una función de mantenimiento remoto. [16]

1.5.3.1. Protocolo Hart y Lazo de Control 4 a 20 mA.

El protocolo HART, (acrónimo del inglés Highway Addressable Remote Transducer) es un protocolo abierto de uso común en el control de procesos, el cual permite la configuración remota y la supervisión de datos de instrumentos en campo. La comunicación HART es un estándar mundial que tiene como objeto la comunicación de dispositivos inteligentes, utilizando un lazo de corriente de 4 a 20 mA para lograr tal fin. Desarrollado a mediados de la década de 1980 por Rosemount Inc y donado a la organización que luego se formó como HART COMMUNICATION FOUNDATION en 1993, este protocolo de comunicación es utilizado por más de 30 millones de dispositivos HART instalados alrededor del mundo, tal éxito se debe a que fue creado para digitalizar información en una infraestructura ya existente. [17][18]

Ningún otro proceso tecnológico se le aproxima en cuestiones de comunicación, alcance de instalación y efectividad general, por lo que hoy en día los fabricantes de dispositivos inteligentes y proveedores en general continúan produciendo dispositivos HART en cifras significativamente importantes. Cerca del 75% de los dispositivos instalados en procesos de todo

el mundo son compatibles con este protocolo, lo cual hace posible beneficiarse de muchas de sus ventajas. [19]

El protocolo HART surge de la necesidad de poder calibrar, modificar características y verificar datos de los instrumentos de medición y elementos finales de control sin la necesidad de parar el proceso ni desmontar el lazo de 4 a 20 mA. Lo anterior con el fin de realizar modificaciones o configurar los dispositivos implicados en el lazo. Para comprender mejor la idea, en el desarrollo de este protocolo básicamente se le agrego software (comunicación HART) al hardware (Lazo de 4 a 20mA) lo cual permite la supervisión de datos y el diagnóstico del equipo en tiempo real, para ello es necesario que el software funciones de manera adecuada en el lazo, ya que errores en el hardware se pueden verificar, lo cual se torna más complejo con los errores de software. [19]

a. Características del Protocolo HART + el Lazo de 4 a 20mA:

- Dado que la corriente siempre presenta información, pero para que dicha información sea leída por el dispositivo receptor este debe estar sensible a voltajes. Para que el tensión y la corriente tengan la misma forma es necesaria la presencia de un elemento puramente resistivo. La caída de voltaje se registra en los dos extremos de la resistencia de 250 Ohms, la cual no constituye ninguna carga para el circuito, pero es necesaria. [19][20]

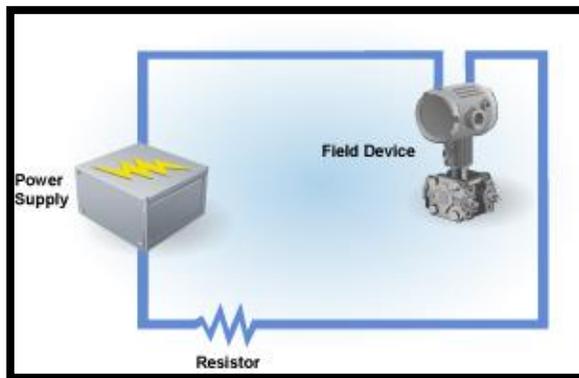


Figura 23. Comunicación punto a punto. [19]

- La comunicación HART de la cantidad de voltaje de alimentación y la cantidad de voltaje que el lazo necesita en función de la distancia del

mismo, además de la resistencia que presenta el receptor y el la generada por el lazo.

- 4mA representa el nivel de salida cero del sensor y 20 mA representa la salida de plena escala del dispositivo.[19]
- Un receptor en un extremo remoto convierte la corriente a un voltaje que oportunamente será procesado por el ordenador o PLC. [19]
- El valor de la corriente no es afectada en todo el lazo por las caídas del voltaje en el cable. [19]
- Es inmune a muchos de los tipos de ruido que interfieren en las comunicaciones convencionales. [19]
- La señal HART consiste en una señal superpuesta a la señal analógica de 4 a 20 mA.[20]
- El Protocolo HART usa la norma Bell 202 Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK en inglés), para empalmar señales digitales de comunicación a bajo nivel sobre el lazo de 4 a 20 mA. Lo que permite la comunicación en un microprocesador de comunicación basado en el modem Belt. [19]

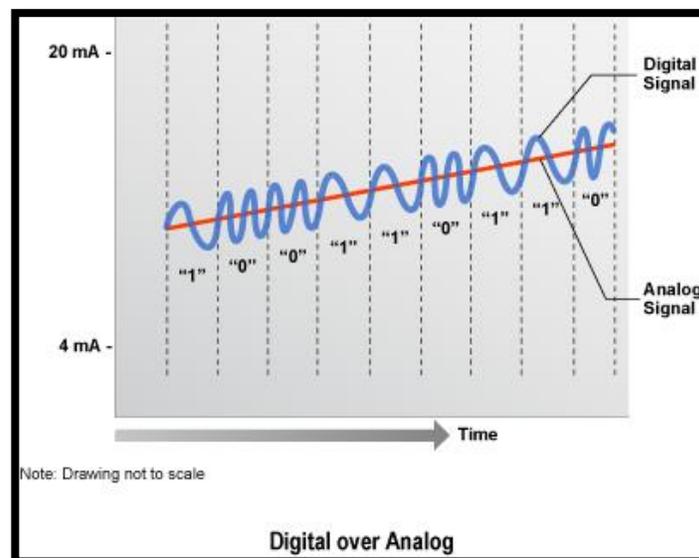


Figura 24. Modulación HART, señal digital sobre la analógica de 4 a 20 mA [19].

- Las frecuencias de funcionamiento utilizadas por el modem que permite la comunicación HART son[19]:

2200 Hz= 0 Lógico

1200 Hz= 1 Lógico

- Las frecuencias anteriormente mencionadas constituyen valores lógicos que permiten la creación del protocolo de comunicación HART. [19]
- El Protocolo HART se comunica a 1200 bps sin interrumpir la señal de 4 a 20 mA y permite a la aplicación central (maestra) obtener dos o más actualizaciones digitales por segundo de un dispositivo inteligente de campo. Por lo tanto la utilización de un lazo de 4 a 20 mA permite la medición de una única variable, mientras que la utilización del protocolo HART permite la supervisión de más variables. [19]
- El protocolo HART permite la retroalimentación con elementos finales de control, lo que permite garantizar el correcto funcionamiento y que está operando bajo las relaciones adecuadas. Esto con el fin de poder realizar correcciones y ajustes. [19]
- 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. [19]
- Es posible implementar un lazo con longitud máxima de más 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. [19]
- Simplicidad proporcionada por las interfaces a través de menús intuitivos.[20]

- Reducción de riesgo y accidentes por medio de un protocolo robusto y preciso.[20]
- Fácil de implementar para máxima efectividad de costo "de entrada".[19]
- Amplia gama de productos, dispositivos compatibles y aplicaciones de software de la mayoría de los proveedores de automatización de procesos. [19]
- Independencia de plataforma para interoperabilidad total en entornos multi-proveedor. [19]

b. Beneficios del Protocolo HART:

- Aprovechar las capacidades de los dispositivos inteligentes y jugar con sus datos para realizar mejoras operativas.[21]
- Tener información temprana de variaciones de rendimiento en los dispositivos, productos o procesos. [21]
- Hacer más breve el tiempo de identificación y corrección de inconvenientes entre el diagnóstico y la solución. [21]
- Valorar de manera continua el estado de los circuitos y estrategias del sistema de control. [21]
- Aumentar la productividad del equipo y disponibilidad del sistema. [21]

Aumentar la disponibilidad de la planta.

- Integrar dispositivos y sistemas para detección de problemas de difícil diagnóstico. [21]
- Descubrir en tiempo real problemas de conexión en dispositivos y/o procesos. [21]

- Minimizar el impacto de errores en el proceso al proporcionar advertencias oportunas. [21]
- Evitar el alto costo que traen consigo los paros e interrupción en el proceso. [21]

Reducir los costos de mantenimiento.

- Verificación y valoración eficiente de circuitos de control. [21]
- Configuración remota de dispositivos. [21]
- Utilización de diagnósticos remotos con el fin de disminuir las pruebas de campo innecesarias. [21]
- Captura de datos de tendencias para diagnóstico de mantenimiento predictivo. [21]
- Reducción del inventario de refacciones y costos de administración de dispositivos. [21]

Mejorar el cumplimiento reglamentario

- Facilitar la prueba de paros automáticos de seguridad. [21]
- Permite realizar diagnósticos avanzados, lo cual eleva los niveles de seguridad. [21]
- Utilización de dispositivos multivariables para informes más precisos y completos. [21]

c. Debilidades del Protocolo HART:

- El protocolo HART se propaga a una velocidad de 1200 bits por segundo, lo cual no permite su utilización en aplicaciones que requieran de respuestas rápidas. [22]
- Es implementado en su mayoría para el monitoreo de variables, equipos y ajuste de los mismos. [22]

- A pesar de ser muy intuitivo, puede ser necesario entrenamiento para puesta en marcha, solución de problemas y calibración. [22]
- Requiere estar aterrizado y aislado de manera adecuada para evitar errores de comunicación en la red. [22]

d. Topologías de Conexión:

“HART” es un acrónimo en inglés para Transductor Remoto Direccional en Red. El Protocolo HART usa la norma Bell 202 de Modulación por desplazamiento de frecuencia FSK por sus siglas en inglés para empalmar señales digitales de comunicación a bajo nivel sobre 4 a 20 mA, lo que permite una comunicación bidireccional en campo y hace posible transmitir datos adicionales a la variable de procesos. La velocidad del protocolo HART le permite lograr dos o tres actualizaciones digitales por segundo de un dispositivo en campo.

La Tecnología HART está basada en una configuración maestro/esclavo, esto quiere decir que un dispositivo inteligente de campo (esclavo) sólo habla cuando el maestro hable. El Protocolo HART se puede utilizar en diversos modos, como punto a punto o multipunto con el fin de transmitir datos hacia y desde los instrumentos de campo y el sistema de monitoreo. Dicha comunicación se produce a través un cable de instrumentación de calidad estándar y el uso de prácticas de cableado y terminales regulares. [19][23]

- Comunicación punto a punto

La señal digital de tipo FSK contiene la información del dispositivo incluyendo el Tag (etiqueta), descripción, mensajes, fechas de calibración, unidades, estado del dispositivo, diagnóstico, valores medidos o calculados adicionales, valores de amortiguamiento, entre otros. Juntos, los dos canales de comunicación proporcionan una solución completa de comunicación de campo muy robusta a bajo costo la cual es sencilla de usar y configurar. [19]

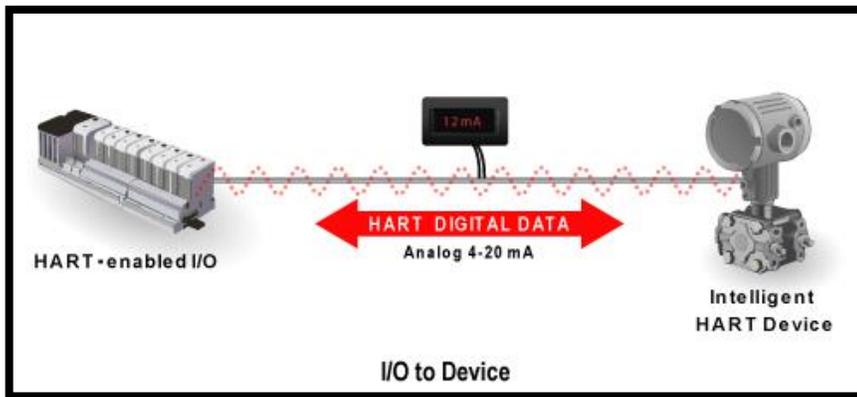


Figura 25. Dos canales de comunicación. [19]

El Protocolo HART es capaz de soportar hasta dos tipos de maestro (primario y secundario), lo cual permite usar maestros secundarios a manera de comunicadores de mano, sin necesidad de interferir con las comunicaciones hacia el sistema de monitoreo.[19]

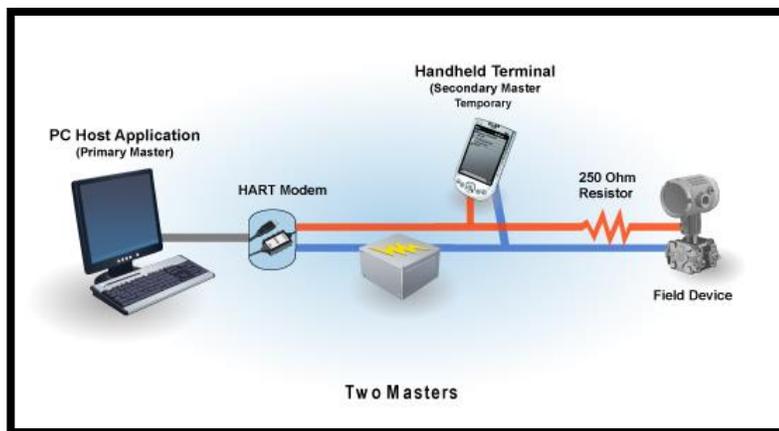


Figura 26. Conexión de dos maestros (primario y secundario) y un esclavo. [19]

- comunicación multipunto

Esta opción de modo de comunicación tipo "ráfaga" donde un único servidor puede transmitir continuamente un mensaje de respuesta estándar HART. para la utilización de este tipo de conexiones tenga éxito los dispositivos deben tener direcciones diferente (diferentes de la dirección cero). se debe tener cuidado con las variaciones muy rápidas en el lazo de 4 a 20 mA, o sea la señal correspondiente a la variable

principal del proceso, ya que esto puede afectar la modulación de tipo FSK.[19]

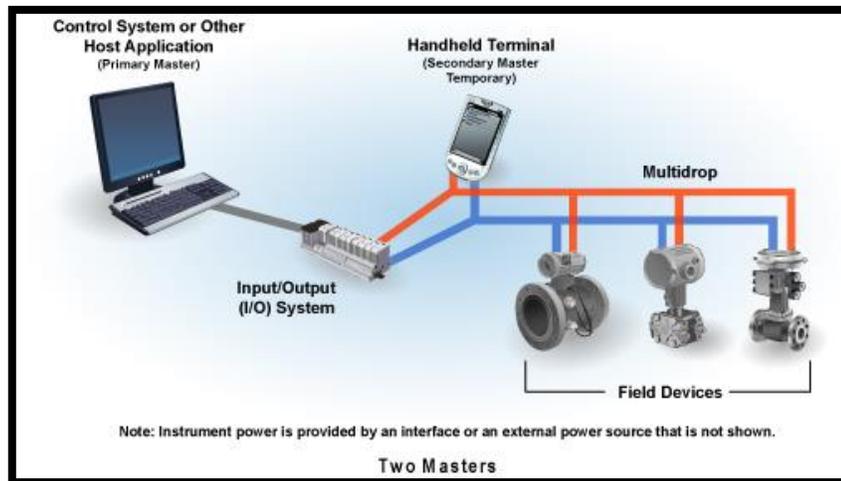


Figura 27. Configuración Multipunto. [19]

Es recomendable implementar esta configuración solo en operaciones de monitoreo de variables. Debido a su bajo costo de instalación esta es una aplicación con ventajas considerables. [19]

2. METROLOGÍA, NORMAS Y ESTÁNDARES.

A continuación se presentan temas que permiten entrar en el entorno de las normas, metrología y estándares utilizados en el manejo de la variable presión. Para la documentación del proyecto fueron fundamentales las visitas que se hicieron a los laboratorios del Instituto nacional de metrología (INM) y el laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); las cuales permitieron observar como esta en la actualidad el manejo de la variable presión en el país.

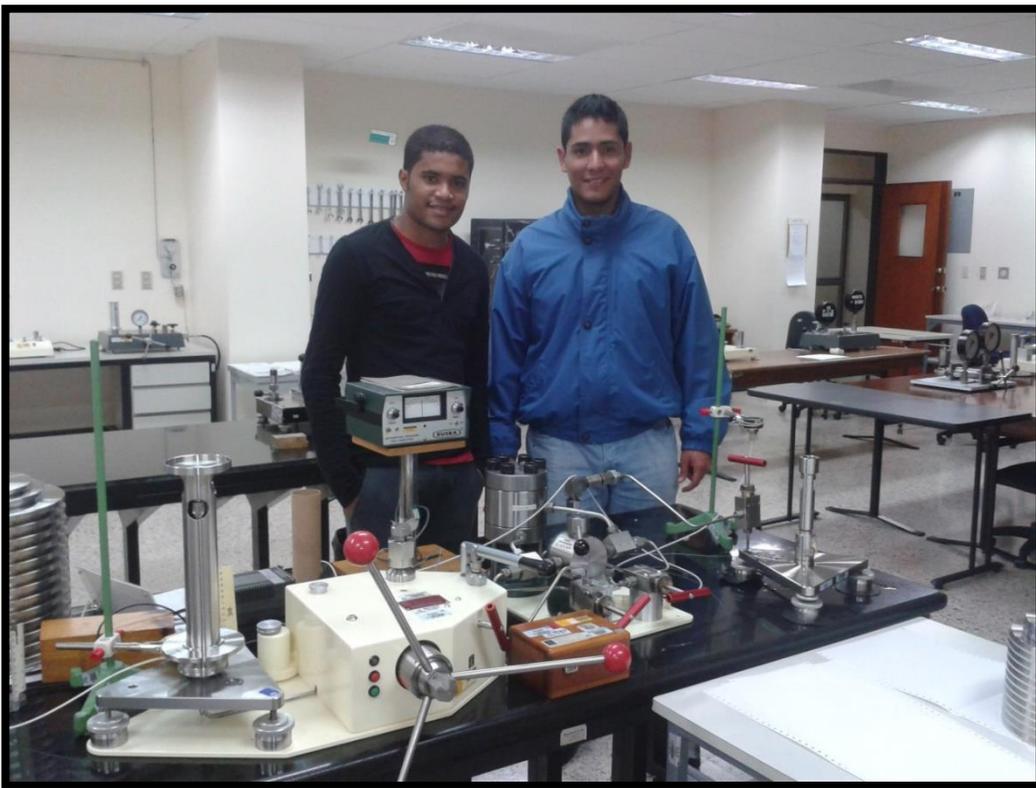


Figura 28. Evidencia visitas a laboratorios de metrología.

2.1. METROLOGÍA:

Es la ciencia de la medición. Abarca tanto los aspectos teóricos de la medición como los prácticos, teniendo en cuenta la incertidumbre de medida en cualquier campo de aplicación. Normalmente se hace una distinción en los campos de aplicación de la metrología, encontrando la metrología legal,

metrología industrial y metrología científica; quienes difieren en la rigurosidad de algunos procedimientos con relación a otros según sea el caso. [24]

2.1.1. Metrología Legal:

Según la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) la metrología legal comprende toda aquella actividad para la que se prescriben requisitos legales sobre mediciones, unidades de medida, instrumentos y métodos de medida con el fin de garantizar un nivel adecuado de credibilidad en los resultados de medida en el marco regulador nacional. Las autoridades gubernamentales realizan o tienen bajo su responsabilidad estas actividades. Por lo general, la metrología legal incluye disposiciones relacionadas con las unidades, los resultados y los instrumentos de medida. Estas disposiciones recogen las obligaciones legales relacionadas con los resultados de medida y los instrumentos de medida, así como el control legal ejecutado por el gobierno o que está bajo su responsabilidad. Por ejemplo el INM (Instituto Nacional de Metrología) en Colombia.

2.1.2. Metrología Industrial:

Son los procesos metrológicos que se llevan a cabo en la industria manufacturera; realizando calibración, control y mantenimiento a todos los equipos de medición involucrados en la elaboración de un producto, logrando con esto que sean de conformidad con normas estipuladas. [25]

2.1.3. Metrología Científica:

Basa sus procedimientos en la investigación, desarrollo y reconocimiento de patrones primarios de medición para la unidad base y derivadas del sistema internacional de unidades, SI. [25]

2.2. VOCABULARIO METROLÓGICO:

A continuación se presenta un vocabulario referenciado al instituto nacional de metrología, en el cual se encuentran conceptos básicos e importantes con información necesaria para abordar el área de la metrología y que ilustran temas presentados en el proyecto.

2.2.1. Magnitud:

Es la propiedad de un cuerpo, sustancia o fenómeno, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia. [24]

2.2.2. Unidad de Medida:

Es una magnitud escalar real, adoptada y definida por convenio, la cual puede ser comparada con otras magnitudes de la misma naturaleza y poder expresar la relación entre ambas mediante un número. [24]

2.2.3. Medición:

Es un proceso que permite obtener uno o varios valores de manera experimental; los cuales se atribuyen a una magnitud de manera razonable. [24]

2.2.4. Dispositivo de Medida:

Dispositivo utilizado para realizar mediciones, solo o asociado a dispositivos suplementarios. [24]

2.2.5. Instrumento de Medida con Dispositivo Indicador:

Instrumento de medida que produce y permite enviar señal con información sobre el valor de la magnitud medida. [24]

2.2.6. Instrumento de Medida con Dispositivo Visualizador:

Instrumento indicador en el que la señal de salida se presenta en forma visual. [24]

2.2.7. Intervalo de Medidas:

Es el conjunto de los valores de magnitudes de una misma naturaleza, que un instrumento o sistema de medida dado puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas. En algunas magnitudes, se utilizan los términos de rango de medida o campo de medida. [24]

2.2.8. Resolución:

Es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente; cabe resaltar que la resolución puede depender del ruido interno, externo, de la fricción y también del valor de la magnitud medida. [24]

2.2.9. Transductor de Medida:

Dispositivo utilizado en medición, que hace corresponder a una magnitud de entrada una magnitud de salida, según una relación determinada. [24]

2.2.10. Patrón de Medidas:

Es quien genera o mide una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, la cual es tomada como referencia. [24]

2.2.11. Calibración:

Es la operación que, bajo condiciones especificadas, establece en una primera etapa, 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. Cabe resaltar que con la calibración no se corrigen los defectos o errores en los instrumentos de medida, si no que permite identificarlos y cuantificarlos; información que sirve para tomar una acción correctiva. [24]

2.2.12. Ajustar:

Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir. [24]

2.2.13. 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. [24]

2.2.14. 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. [24]

2.2.15. 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. [24]

2.2.16. Repetibilidad de Medida:

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones como: Realizar el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, el mismo lugar entre otras según lo requerido. [24]

2.3. NORMA:

Una norma es un documento técnico-legal con un conjunto de reglas, se identifican por poseer las siguientes características:

- Contienen especificaciones técnicas de aplicación voluntaria. Aunque en algunos casos es posible contraer problemas legales por el incumplimiento de estos principios. [26]
- Son elaborados por consenso de las partes interesadas: Fabricantes, administraciones, usuarios, consumidores, centros de investigación, laboratorios, asociaciones y colegios profesionales. [26]
- Están basados en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico. [26]
- Son aprobadas por un organismo nacional, regional o internacional de normalización. [26]
- Son de dominio público. [26]

Las normas ofrecen un lenguaje de punto común de comunicación y aplicaciones entre las entidades que de ellas se benefician, estableciendo de esta manera cierto equilibrio socioeconómico entre estos agentes. [26]

2.3.1. Tipos de Norma:

- **Norma de Facto:** especificación técnica que ha sido desarrollada por una o varias compañías, la cual adquiere importancia debido a las condiciones de aplicación y del mercado. [26]
- **Norma de Jure:** especificación técnica aprobada por un órgano de normalización para la aplicación de la misma de forma repetida o continuada, sin que dicha norma sea de obligado cumplimiento. [26]

2.3.2. Normas Aplicadas en el Diseño del Banco.

a. Requisitos Generales Para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración. (ISO/IEC 17025-1999).

Posee los requisitos a cumplir en los laboratorios o entidades que realicen mediciones, ensayos, muestreos y calibraciones si desean demostrar que poseen un sistema de gestión, y que son técnicamente competentes y capaces de generar resultados técnicamente válidos. La norma es aplicable a todos los laboratorios que realicen actividades relacionadas con ensayo y calibración utilizando métodos normalizados, no normalizados o propios del laboratorio, su aplicación dependerá de las actividades que desarrolle el laboratorio y según estas se aplicara o no todos los puntos de la norma. La norma ISO17025 está estrictamente ligada con la norma ISO9001 por consiguiente es necesario el cumplimiento de las dos simultáneamente.

El uso e implementación de esta norma facilita la cooperación entre laboratorios y organismos relacionados con actividades de ensayo y calibración, así como al personal que en ellos desempeñan labores. También favorecerá el intercambio de información, experiencias y procedimientos.

La norma ISO 17025 principalmente posee dos tipos de requisitos los cuales se deben cumplir a cabalidad en los laboratorios de ensayo y calibración: los requisitos técnicos, que es en donde se manifiestan los requerimientos y condiciones que debe cumplir el personal que trabaje en los laboratorios, así

mismo la infraestructura de las instalaciones en las cuales se realicen los ejercicios de calibración y ensayos, además de las precauciones y condiciones ambientales aceptables. Los requisitos de gestión, se basa en el sistema de gestión que debe cumplir el laboratorio en cuanto a la parte legal, en las diferentes normas que se deben aplicar para satisfacer las necesidades del cliente. [26]

b. Principios de Aseguramiento del Control Metrológico. (GTC 63).

Estos definen aspectos de suma importancia para la metrología, como lo son el proceso de medición, sistemas de medición, además de los principios fundamentales de aseguramiento metrológico. También se explican los sistemas de medición metrológicas cuando se fabrica y se utiliza un instrumento de medición, así como los pasos claves para llegar a dicha fabricación y realizar mediciones exitosas. [26]

Las estrategias de intervención del control metrológico, las cuales están determinadas por leyes y reglamentaciones están diseñadas para intervenir durante el proceso de fabricación y uso, los principales aspectos son: evaluación y aprobación de patrones de medición, requisitos de instalación, verificación inicial en fábrica y en uso, requisitos ambientales y especiales como licencias, recolección de datos e ítems a medir y requisitos exigidos al personal de servicio. [26]

Con el fin de tener buenos resultados es necesario conocer factores como la incertidumbre, los factores para la selección de controles metrológicos y el control de metrología legal. Saber cómo se deben controlar y aplicar en un proceso de fabricación es de mucha importancia. [26]

c. Guía Sobre la Incertidumbre de la Medición Para Principiantes. (GTC 115).

Una de las características principales de toda medición es que está compuesta por una cantidad y una unidad de medida, las cuales al efectuar generan cierto tipo de incertidumbre, la razón primordial es la desconfianza en el valor obtenido, ya que no se conoce la veracidad del valor indicado, lo cual genera una cuantificación de duda. Otra razón es que se presente un error en la

medida, pero esta situación a diferencia de la incertidumbre si es constante, por ende puede ser hallada y establecida. [26]

Para la calibración y ensayo de instrumentos, el conocer la incertidumbre es de mucha importancia, ya que esto permite la aprobación o el descarte del instrumento, sin embargo es recomendable la realización de varias mediciones (entre 4 y 5 lecturas) antes de pasar al siguiente proceso. la toma de muchas medidas diferentes permite realizar un promedio entre ellas y reducir al mínimo la incertidumbre. El no estar en condiciones perfectas, cambios por el paso del tiempo, desgaste y factores externos pueden ser fuentes de incertidumbre; sin embargo si el elemento que va a ser objeto de medición tiende a ser inestable puede generar este tipo de diferencia, sin contar con que el proceso de medición sea difícil de ejecutar.

La destreza y capacidades que tenga un operario al manipular los instrumentos de medición juegan un papel importante a la hora de realizar las medidas, ya que una buena al operarlos de una manera adecuada se disminuye en gran cantidad los errores de medida. Cabe aclarar que los errores de los operarios con los instrumentos no son fuentes de incertidumbre. [26]

d. Guía Para Calibración de Patrones de Medida. (GTC 60).

La calibración de patrones es una operación importante para la acreditación de un laboratorio de calibraciones y ensayo para cualquier variable de medición. La Guía Técnica Colombiana GTC 60 plantea una serie de requisitos básicos para la verificación de medios de modulación de presión tales como: [26]

- barómetros empleados en servicios meteorológicos y de aviación civil[26]
- manómetros usados para la supervisión de seguridad mecánica (calderas y tanques) [26]
- manómetros usados para la medición de las características de materiales (control de calidad) e industria de hidrocarburos. [26]

Los patrones de referencia de referencia utilizados son los barómetros de mercurio y un juego de manómetros de pistón y pesas, también llamado

balanza de presión. Es necesario establecer procedimientos para el control de su funcionamiento en el lugar de uso. [26]



Figura 29. Manómetro de pistón [30]

La gravedad juega un papel importante en la calibración de instrumentos, los certificados de calibración para barómetros de mercurio y para balanzas de presión usualmente esta basados en el valor convencional de la gravedad el cual es $g_n = 9,80665 \text{ m}^2/\text{s}$. Luego de realizar la calibración del instrumento en un lugar con gravedad relativa g_r , es necesario multiplicar todos los valores del certificado por la relación g_n/g_r , con el fin de tener en cuenta la gravedad en el sitio de calibración. Hay que considerar que la gravedad cambia con la latitud y la altitud en grados significativos.

La información acerca de la calibración de medios de medición de presión, además de las precauciones para el manejo y mantenimiento de barómetros de mercurio y balanzas de presión es ofrecida por:

- Servicios de medición: Presión y vacío, por el Laboratorio Nacional de Física, U.K, 1984.
- La balanza de presión. Una guía para su uso, por S: Lewis y G.N. Peggs, Laboratorio Nacional de Física, U.K, 1979.
- Manómetro para líquidos - PTB instrucciones de ensayo, Physikalish Technische Bundesanstalt, Braunschweig 1980. [27]

e. Manómetros Tipo Bordón, Dimensiones, Requisitos y Ensayos. Norma Técnica Colombiana. (NTC 1420).

En esta norma se especifican los requisitos para manómetros tipo Bourdon, los cuales fueron utilizados en el módulo de ensayo de presión manométrica. También manifiesta los requerimientos para manómetros de vacío, de presión

y combinados, ya sean en forma circular, en espiral o en forma de resorte. De igual manera trata factores como el tamaño y los intervalos de edición para la medición de presión manométrica. [28]

Los manómetros especificados poseen cuadrantes circulares con intervalos concéntricos para uso industrial de ensayo, además de que las lecturas de mayor importancia y de mayor fidelidad se dan en los dos cuartos medios de la escala total. Habiendo mencionado lo anterior es preciso recomendar no exceder el 75% del rango total de deflexión de la escala. [28]

Esta norma se aplica para manómetros adecuados para el uso industrial con fluidos utilizados en este tipo de ambientes. Se aplica también para manómetros llenos con líquido, manómetros para gases a alta presión y manómetros para uso con oxígeno o acetileno. No es aplicable para manómetros con contactos eléctricos. [28]

Entre los aspectos importantes a considerar podemos encontrar la que hace mención al rango y a como debe ser especificado (resolución del manómetro), efectos de la temperatura, la resistencia, temperatura nominal de servicio, efectos de choque mecánico y vibración, posiciones de montaje, seguridad entre otras, todo este tipo de información está registrada e ilustrada en una serie de tablas en esta norma NTC 1420. Según el ASME B40.100 el cual habla de la exactitud de este tipo de dispositivos de medición y menciona que esta dependerá del grado específico para el instrumento, teniendo como consideración estándar que para la medición de procesos el grado 2A, la cual establece un error máximo de 0.5% de span. Otros aspectos como los ambientes de operación corrosivos, el desgaste de y falla del tubo Bourdon por usar los monómeros a full-escala y el material de la carcasa protectora también son de mucha importancia. La aplicación de esta norma permitirá que el proceso cuente con instrumentos y mediciones muy confiables para el tipo de prácticas que se realicen. [28]

f. Metrología. Manómetros indicadores de presión. Manómetros de Vacío y Manómetros de Presión y Vacío Para Usos Generales. Norma Técnica Colombiana. (NTC 2263).

Esta norma especifica la principales características metroológicas que deben poseer los manómetros indicadores de presión, manómetros de vacío y manómetros de presión y vacío, con elementos sensores elásticos e indicación

directa, utilizado en la medición de presiones manométricas y/o presiones vacuométricas de líquidos, vapores y gases. [29]

Esta norma especifica los requerimientos impuestos por la metrología legal para instrumentos en los cuales la secuencia de medición mecánica transmite directamente la información del sensor elástico a un elemento indicador, el cual consiste en una aguja y una escala graduada. Algunos de los requerimientos ya fueron tratados en la norma NTC 1420, la diferencia se yace en los tipos de medición realizadas por estos instrumentos (vacío y presión-vacío), algunos de estos requerimientos hacen referencia a las unidades de presión, rangos de medición, variaciones en condiciones normales de uso, errores de medición e histéresis en la verificación, constancia de indicaciones durante el servicio, requerimientos referentes a los dispositivos indicadores (aguja indicadora), inscripciones y designaciones, entre otras características. El conocimiento y aplicación de esta norma permite operar de manera segura y eficiente este tipo de instrumentos de medición, sin riesgo de daños y averías por mal manejo de los mismos. [29]

2.4. Normalización.

Es el proceso con el cual se elaboran, mejoran y aplican las normas aplicadas a distintas actividades de carácter científico, industrial o económico. El objeto de la normalización es plantear y ejecutar reglas para buscar una aproximación ordenada de una actividad de aplicaciones de uso común y repetitivo, buscando la optimización y un orden de alto grado con el fin de reducir los problemas reales y potenciales en contextos determinados. [26]

Es posible que la normalización posea uno o más objetivos específicos, pero fundamentalmente se enfoca en garantizar la aptitud para el uso de un producto, proceso o servicio. Estos objetivos no están limitados a la selección de variedades comodidad de uso, compatibilidad, intercambiabilidad, salud, seguridad, protección de recursos medio ambientales, protección del producto, ejercicio económico y comercial, aunque pueden haber casos especiales. También se puede encontrar la superposición entre objetivos. [26]

2.4.1. Organismos Internacionales de Normalización y Estandarización.

- **ISO:** Organización Internacional para la Estandarización.
- **IEC:** International Electrotechnical Commission.

- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- **ITU:** Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- **IATA:** International Air Transport Association.
- Codex Alimentarius.[26]

2.4.2. Organismos Regionales de Normalización y Estandarización.

- **AMN:** Asociación Mercosur de Normalización.
- **APEC:** Asia-Pacific Economic Cooperation.
- **CENELEC:** Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
- **CEN:** Comité Europeo de Normalización.
- **COPANT:** Comisión Panamericana de Normas Técnicas.
- **CROSQ:** Caribbean Community Regional Organization for Standards and Quality.
- **RAN:** Red Andina de Normalización. [26]

2.4.3. Organizaciones Privadas de Normalización y Estandarización.

- **ACI:** American Concrete Institute.
- **API:** American Petroleum Institute.
- **ASCE:** American Society of Civil Engineering.
- **ASME:** American Society of Mechanical Engineers.
- **ASTM:** ASTM International.
- **HL7:** Health Level Seven Inc.
- **IAPMO:** International Association of Plumbing and Mechanical Officials.
- **NEMA:** National Electrical Manufacturers Association.
- **NFPA:** National Fire Protection Association. [26]
- **NSF:** NSF International.
- **UL:** Underwriters Laboratories Inc. [26]

2.4.4. Organismo Nacional de Normalización y Estandarización.

ICONTEC. Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificación, es el representante en Colombia ante los organismos de normalización internacionales y regionales, entre estos la ISO (International Organization for Standardization), la IEC (International Electrotechnical Commission), y la COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas). De igual forma es soporte gubernamental en los grupos de negociación para la Comunidad

Andina, para el Área de Libre Comercio de las Américas (ALCA) y para los Tratados de Libre Comercio internacionales. Entre sus principales labores se enfatizan la elaboración y publicación de normas técnicas y la certificación de normas de calidad para empresas y actividades profesionales. [26]

2.5. ESTANDARIZACIÓN.

El término estandarización se desprende de la palabra "standar" y hace referencia a un modo o método establecido, aceptado o normalmente seguido para realizar determinado tipo de actividades. Un estándar es un parámetro más o menos estable para ciertas circunstancias o espacios, por ende de ser seguido en caso de recurrir a algunos tipos de acciones, esto garantiza el funcionamiento y acoplamiento óptimo de elementos generados independientemente. De manera frecuente aplicamos muchos estándares sin darnos cuenta, un claro ejemplo de ello es el conectar un electrodoméstico a la red eléctrica, para esto los fabricantes y autoridades han creado un estándar en el tipo de conexión a utilizar. Se considera entonces el fenómeno mediante el cual los procesos de fabricación globales convergen hacia un único estilo que predomina a nivel mundial y que busca establecer similitudes entre cada producto sin importar su procedencia o su destino. [26]

2.6. ACREDITACIÓN.

La acreditación es el proceso realizado de manera voluntaria mediante el cual una organización es capaz de medir la calidad de los servicios prestados y los productos ofrecidos, además del rendimiento de los mismos frente a estándares reconocidos nacional e internacionalmente. Los procesos de acreditación implican principalmente la autoevaluación de la organización, así como una evaluación en detalle por un equipo de expertos externos. Las definiciones específicas respecto a este concepto pueden variar dependiendo a qué tipo de organización se le aplique, en caso de un laboratorio es el proceso de participación voluntaria que contribuye al mejoramiento de la calidad de los servicios del laboratorio a través de una revisión profesional realizada por pares y el cumplimiento de estándares de desempeño establecidos. [26]

2.6.1. Organismos Internacionales de Acreditación.

- IAB: International Accreditation Board
- IAS: International Accreditation Service

- EA: European co-operation for Accreditation
- A2LA: American Association for Laboratory Accreditation
- PJLA: Perry Johnson Laboratory Accreditation
- ACCAB: Accreditation Commission for Conformity Assessment Bodies
- IAA: International Accreditation Agency
- ACI: Accredited Certification International Limited
- AIAO: American International Accreditation Organization
- ASCB: Accreditation Service for Certifying Bodies [26]

2.6.2. Organismo Nacional de Acreditación.

ONAC. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia. El cual es una corporación sin ánimo de lucro cuya naturaleza y participación mixta, regida por el derecho privado, constituida en 2007 de acuerdo con las normas del Código Civil y las normas de ciencia y tecnología, bajo la modalidad de asociación entre el Estado colombiano y los particulares. [26]

El ONAC tiene como objeto principal acreditar la competencia técnica de Organismos de Evaluación de la Conformidad con las normas y criterios señalados en estos Estatutos y desempeñar las funciones de Organismo Nacional de Acreditación de Colombia conforme con la designación contenida en el artículo 3 del Decreto 4738 de 2008 y las demás normas que la modifiquen, sustituyan o complementen.[26]

Las funciones principales del ONAC como organismo nacional de acreditación, son:

- Realizar actividades de acreditación de los organismos de evaluación de la conformidad de acuerdo con la normatividad internacional y nacional aplicable.
- Representar los intereses del país ante organismos regionales e internacionales relacionados con actividades de acreditación y participar en foros nacionales, regionales e internacionales de interés.
- Mantener un registro público actualizado de los organismos acreditados, cuyo contenido y condiciones serán definidos de acuerdo con el reglamento que para el efecto se expida.[26]

2.7. CERTIFICACIÓN.

Es el proceso mediante el cual un tercero, independiente del productor o el comprador, afirma por medio de un documento escrito que el producto, el proceso o el servicio prestado cumple a cabalidad con una serie de requisitos específicos ya establecidos, esto la convierte en una de las actividades más valiosas en las transacciones comerciales nacionales e internacionales. Es un mecanismo irremplazable el cual genera confianza entre cliente-proveedor.

Los sistemas de certificación se caracterizan por poseer sus propias reglas, procedimientos y formas de administración a la hora de realizar una certificación de conformidad. Además, debe ser objetivo, fiable, eficaz, aceptable por todas las partes interesadas, operativo y estar administrado de manera imparcial y honesta. Su principal objetivo, es proporcionar los criterios que aseguren al comprador que el producto que adquiere satisface requisitos.[26]

Todo sistema de certificación debe contar con los siguientes elementos.

- Existencia de Normas y/o Reglamentos.
- Existencia de Laboratorios Acreditados.
- Existencia de un Organismo de Certificación Acreditado.[26]

3. DISEÑO E INGENIERÍA DE DETALLE.

3.1. ZONA DE TRABAJO.

La zona de trabajo en la que se realizaran las actividades de medición y ajuste de instrumentos debe estar basada en la norma ISO17025 e ISO9001, las cuales hacen referencia a las condiciones ambientales que debe tener un laboratorio de ensayos y calibraciones, esta es una forma de asegurarse que en las mediciones realizadas por los dispositivos no intervinieron factores externos y poder contar con resultados confiables.

En aras de lograr lo antes mencionado el laboratorio debe establecer, implementar y mantener un sistema de gestión dependiendo de las actividades que se realicen en él, así mismo debe poseer la documentación en regla, sistemas, programas, procedimientos e instrucciones para realizar ensayos y calibraciones. Es de gran importancia llevar una bitácora donde se especifiquen las actividades realizadas, la cual debe ser de fácil acceso para los operarios del módulo y personal de mantenimiento, con el fin de realizar los mantenimientos y arreglos pertinentes. Este tipo de documentos solo puede ser manipulado por personal autorizado.

Son varios los factores que afectan de manera negativa la veracidad de una medida y los resultados en los procedimientos:

- El primero de los factores que influye en los resultados es error humano, es por esto que se debe contar con personal debidamente capacitado, que posea conocimientos claros del funcionamiento de los equipos, además de la normatividad y las recomendaciones en el manejo de cada equipo. esta persona debe tener pleno conocimiento de los procedimientos a realizar y las variables que influyen de manera directa, con el fin de que cada experiencia culmine de manera exitosa y en los tiempos establecidos.
- El segundo de los factores que influye de manera directa es la planta física del laboratorio y las condiciones ambientales. Los factores externos a la medición siempre serán una fuente de error, por lo cual el laboratorio deberá contar con una serie de condiciones para lograr el correcto funcionamiento de los dispositivos, dentro de los rangos

aceptables de medición. Es necesario llevar registro de las condiciones ambientales y determinar cómo estas afectan el desarrollo de los procedimientos. Condiciones ambientales con presencia de ruido, vibraciones, humedad, temperatura, interferencias electromagnéticas, polvo y demás elementos que causen erosión deben evitarse, ya que pueden ocasionar lecturas no deseadas y daño en los equipos. Se deben separar las diferentes áreas de trabajo del laboratorio para evitar la contaminación cruzada, además se debe asegurar el orden y la limpieza del laboratorio.

Los procedimientos de ensayos deben realizarse de la manera recomendada, en la cual se expondrá la forma más adecuada de realizar el muestreo, la manipulación, el transporte, almacenamiento y preparación para la puesta en marcha de los instrumentos. También deben tenerse manuales de uso y funcionamiento de los equipos, así como los manuales de los dispositivos y especificaciones de los mismos.

El software de adquisición de datos debe estar bien documentado y plasmado en las guías de operación del módulo, se deben guardar y proteger los datos adquiridos en el procedimiento y además de eso se debe realizar mantenimientos periódicamente para garantizar su adecuado funcionamiento.

3.1.1. Parámetros del Laboratorio de Instrumentación.

Un ambiente de trabajo donde se tenga el control de los factores externos que interfieren con el ensayo y la medición de variables, sería un espacio ideal para efectuar esta clase de actividades. El monitoreo de variables externas al proceso de medición es el primer paso para garantizar las condiciones óptimas para el ensayo y calibración en el laboratorio, ya que esto permite tomar medidas y ajustar las condiciones de la zona para un mejor desempeño de los instrumentos.

3.1.1.1. Transmisor Indicador de Temperatura y Humedad Relativa.

Para lograr las condiciones propicias en el espacio de trabajo, contamos con un transmisor indicador de temperatura y humedad relativa de la marca AUTONICS modelo THD-WD1-C, este dispositivo permite la comunicación mediante un lazo de 4 a 20 mA. Este instrumento permite el monitoreo de los

niveles de humedad y temperatura, factores que deben ser controlados por el personal de laboratorio.



Figura 30. Transmisor de temperatura y humedad.

Luego de tener la información del transmisor pueden realizarse maniobras para mejorar de las condiciones de trabajo basadas en la norma ISO 17025, según esta, la temperatura debe ser de alrededor de 20°C y la humedad relativa de entre 40% y 50% de humedad relativa. En la tabla 1 se especifican los valores reales según la norma. Para mayor información sobre los principios de operación y características del dispositivo remitirse al anexo D.

3.1.1.2. Reloj.

El control de tiempo en la zona de trabajo es también un factor que contribuye al orden y a la organización en ambientes de ensayo y calibración, permite llevar un control en los fines académicos que tiene cada módulo y banco de ensayo en el laboratorio de instrumentación, con el fin de lograr una mayor eficiencia en las operaciones. Es por esto que se instaló un reloj digital ubicado en un lugar visible y esta sincronizado de manera manual con los datos suministrados por la superintendencia de industria y comercio.



Figura 31. Reloj instalado en el laboratorio.

N°	Local	Limpieza	Temperat	Humedad	Gradiente	Gradiente	Cargas int. kW
			°C	Relativa %	Termico Espacial	Termico Temporal	
1	1001	Laboratorio	20 ± 0,3 °C	40 a 50	0,5° C/m	0,5° C/h	2,0 kw
		medición					
2	2001	Laborat 1	20 + 0,5 °C	40 a 50	0,5 °C/m	0,5 °C/h	1,6 kw
2	2002	Laborat 2	20 + 0,5 °C	40 a 50	0,5 °C/m	0,5 °C/h	1,3 kw
2	2003	Hall ingreso	20 + 0,5 °C	40 a 50			0,5 kw
2	2004	Transfer	20 + 1 °C	40 a 50			0,3 kw
2	2005	Sala Recep	20 + 1 °C	40 a 50			0,8 kw
		y limpieza					

Tabla 1. Parámetros en la norma 17025

3.2. SELECCIÓN DE EQUIPOS.

La selección de equipos se realizó teniendo en cuenta el tipo de instrumentos que cualquier profesional podría encontrar en su campo laboral, en procesos de extracción de hidrocarburos, manejo de gases, líneas neumáticas e hidráulicas entre otros. Observando la necesidad que posee la industria por encontrar profesionales capacitados en ciertos aspectos de la instrumentación industrial y el manejo de variables, así como sistemas de comunicación en campo. Se seleccionaron una serie de dispositivos que cumplieran con los requerimientos de las normas y además de ello, tuvieran una robustez significativa y resistencia a la corrosión ya que este módulo será manipulado de los estudiantes.

3.2.1. Transmisor Smar LD291.



Figura 32. Imagen izquierda, transmisor Smar LD291 [37],
Imagen derecha, Renderizado del transmisor LD291.

Para la medición de la variable presión son utilizados gran cantidad de dispositivos que permiten una medición confiable de dicha variable. Es posible encontrar transductores electrónicos que funcionen con los principios de operación conocidos para la medición de la variable presión, además se

pueden encontrar casi en cualquier rango de operación requerido. Otros dispositivos para la medición de la presión son las sondas de pozo y los presostatos, los cuales son muy conocidos en la industria por su robustez y confiabilidad, pero con características de comunicación y operatividad limitadas, en nuestro caso se optó por un transmisor de procesos, que no solo proporciona el valor de la variable sino que posee una serie de ventajas por encima de los anteriormente mencionados. La empresa Smar garantiza el correcto funcionamiento y la confiabilidad de este equipo mediante su certificado de calibración, para mayor información remitirse al anexo B.[36]

El dispositivo escogido fue el transmisor indicador de presión relativa Smar LD291, estos Transmisores de Presión Inteligentes usan los sensores capacitivos (celdas capacitivas) como elementos detectores de presión, el rango de operación puede escogerse a la hora de la compra con el fabricante. Para el caso del módulo de presión implementado en este módulo el rango es de 0 psi a 366 psi. y posee una conexión a procesos de 1/2 NPT hembra.

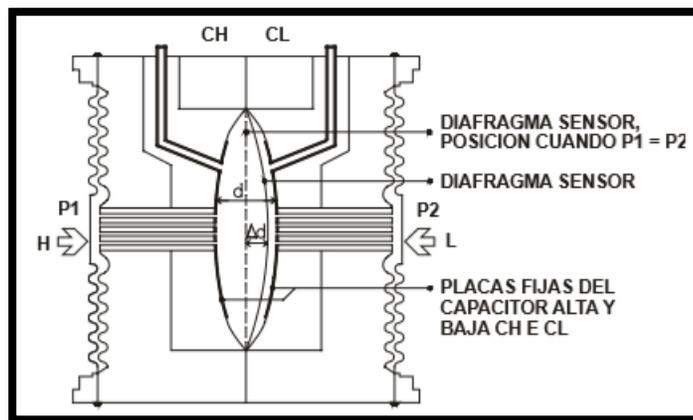


Figura 33. Celdas capacitivas.[37]

Donde P1 y P2 son las presiones en las cámaras H y L, CH =capacitancia entre la placa fija en el lado P1 y el diafragma sensor. CL =la capacitancia entre la placa fija en el lado P2 y el diafragma sensor. d = distancia entre las placas fijas CH y CL. Δd = deflexión del diafragma sensor debida a la presión diferencial $DP = P1 - P2$.[37]

Este equipo es muy utilizado en la industria por su robustez, ya que posee la capacidad de soportar de buena forma las inclemencias del tiempo y factores externos que puedan afectar la medición de la variable. La comunicación de

este tipo de dispositivos se basa en el tan utilizado lazo de 4 a 20 mA, incluyendo el protocolo de comunicación HART para realizar ajustes, calibración y toma de datos en forma remota, sin necesidad de parar la proceso o desconectar el equipo, lo que lo convierte en un transmisor de tipo hibrido por integrar comunicación analógica y digital. Esta comunicación es posible atreves de un modem basado en la tecnología Belt, la cual realiza una modulación en frecuencia de tipo FSK.

Posee una circuitería interna que le permite digitalizar la información de que proporciona la celda capacitiva y de esta manera poderla modular, para que esta pueda ser transmitida del servidor al dispositivo maestro. Además permite medir otro tipo de variables externas que interferirían con el proceso para poder tener datos más detallados y relevantes sobre el proceso. Estos dispositivos más avanzados permiten la gestión remota de datos con el fin de implementar estrategias de manera rápida y eficiente. Tiene un sistema de visualización que permite obtener información en tiempo real por el usuario, lo que significa que no solo puede verificarse la información de manera remota, sino también estando cerca del transmisor sin acceder a un software. Además de que permite medir otro tipo de variables externas que interferirían con el proceso para poder tener datos más detallados y relevantes sobre el proceso.

3.2.2. Transmisor Smar LD301.

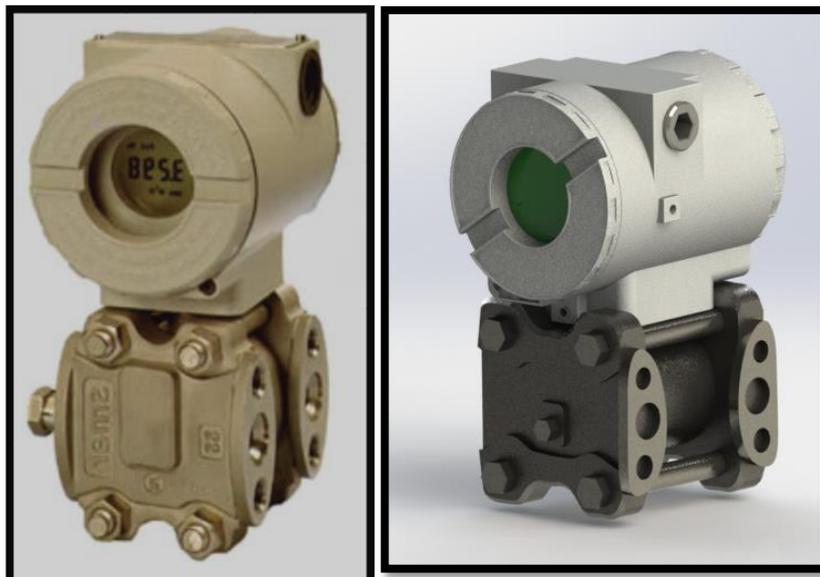


Figura 34. Imagen izquierda, transmisor de presión diferencial LD 301 [39], Imagen derecha, renderizado transmisor de presión diferencial LD 301

El transmisor Smar LD 301 funciona también con el principio capacitivo, pero a diferencia del LD 291, este sirve para medir presión diferencial en una tubería o en una red de tuberías. Con la medición de la presión diferencial se pueden inferir otro tipo de variables de medida como el nivel, el caudal, entre otras. Para nuestro caso se utilizara con el fin de visualizar el valor de la presión diferencial y transmitirla también vía HART a través de una conexión multipunto o multidrop. Esto se realizara utilizando la infraestructura ya existente, la cual consiste en el lazo de corriente de 4 a 20 mA. Este también es un transmisor híbrido ya que combina la comunicación analógica del lazo 4 a 20 mA y la comunicación digital del protocolo HART. Posee conexiones a proceso de 1/2 NPT y es de características similares al transmisor de presión relativa en cuanto a robustez y fiabilidad. Su rango de operación es hasta 360 psi de presión diferencial, y se requirió

Su sistema interno es similar al del transmisor indicador de presión relativa Smar LD 291 en cuanto a su funcionamiento y características. Posee un sistema de visualización que también permite monitorear los datos personalmente sin acceder al equipo de manera remota, conversores D/A, osciladores, aisladores de señal, memoria EEPROM, modem de tecnología Belt, controlador de display, entre otros que permiten la comunicación e interacción de estos dispositivos servidores con dispositivos maestros.

Una de las particularidades de este dispositivo es la posibilidad de configurar un control PID con el fin de manipular un elemento final de control. Esto se constituye en un valor agregado, el cual suma puntos a favor al realizar la escogencia de este por encima de otros. El darle uniformidad al módulo, es también es otro factor que influyó a la hora de optar por este dispositivo, además de que previamente ya se había tenido una experiencia con el uso del transmisor Smar LD 291.

3.2.3. Manómetros.

Antes de la utilización de dispositivos electrónicos y digitales en los procesos, eran implementados dispositivos analógicos. Estos dispositivos, entre el más común el manómetro de tubo Bourdon, es aun implementado a pesar de los avances tecnológicos. Estos constituyen una herramienta eficiente en la medición de la presión, permitiendo visualizarla en tiempo real de manera

rápida; aunque la confiabilidad en la medida de estos dispositivos es relativa y el rango de operación es limitado.



Figura 35. Imagen izquierda, manómetros Swagelok[40], Imagen derecha, renderizado de un manómetro

Para la utilización e implementación de manómetros hay una serie de recomendaciones que se deben seguir con el fin de prolongar la vida útil del dispositivo y evitar daños, y además de esto realizar una buena medición. Entre las recomendaciones más importantes están, el no llevar nunca el manómetro a su full scale, ya que esto podría ocasionar la elongación y el daño del tubo Bourdon. Otra recomendación es realizar las mediciones entre el segundo y tercer cuadrante, ya que es dentro de este rango de medición donde el manómetro es más exacto y brinda una medida más confiable.

Los manómetros escogidos para implementar en este módulo son de propósito general, proporcionados por la marca Swagelok, una de las más confiables en el mercado, lo que prácticamente garantiza su robustez y confiabilidad. Estos dispositivos son de la serie PGI-63C-PGXXX-LAO1, lo cual quiere decir según el manual del fabricante:

- (PGI). Manómetros industriales.[40]
- (63C).Tamaño de la esfera es de 63 mm (2-1/2 pulg) .[40]
- (PGXXX).Rango de los manómetros los cuales son de 30 psi, 60 psi, 100 psi, 120 psi, 200 psi, 300 psi .[40]

- (LAO1).Conexión vertical, tamaños del racor 1/4 NPT y el fluido de relleno es glicerina. [40]

Fueron escogidos con estas especificaciones ya que cumplían con los requerimientos de espacio y con la resolución deseada para los manómetros que se utilizarían en el módulo. Además se tuvo en cuenta las facilidades de montaje y la estabilidad en la medida, así como los rangos de medición.

3.2.4. Tubo de PFA.

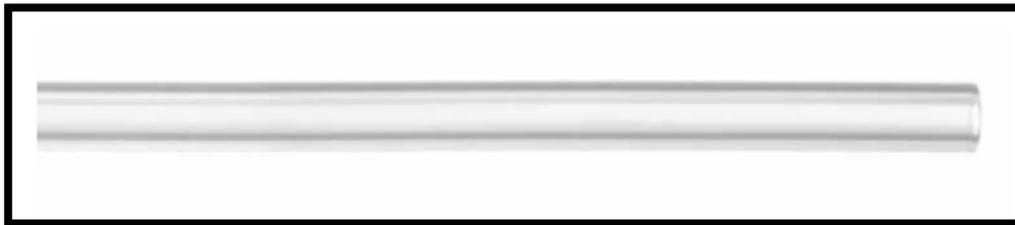


Figura 36. Mangueras y tubos flexibles, material PFA.[41]

Es común ver en la industria la utilización de tubing, mangueras acorazadas y tubos flexibles como medio de interconexión entre dispositivos, estas permiten transportar un fluido soportando la presión con la que este circule. Dependiendo de cuanta presión se trabaje, el fluido transportado y la presión inyectada en los lazos de presión, se utilizan medios de interconexión diferentes, siendo el tubing el más confiable.

Para el módulo de presión se utilizó manguera flexible, por sus fines académicos. Y ya que se trabajara con presiones limitadas y ya que se requiere que el modulo posea cierta flexibilidad a la hora de montar y desmontar, se descartaron las opciones de tubing y manguera acorazada.

El tubo flexible de PFA translúcido y químicamente resistente, es un material con bajo coeficiente de rozamiento, soporta altas temperaturas y es resistente químicamente. Perfluoroalcohexil (PFA) con ánima lisa es el material con el que está fabricado el tubo flexible de la marca Swagelok, el ánima del tubo es el recubrimiento de la cara interna del mismo, y quiere decir que no tiene canales ni líneas guía. El diámetro del tubo es de 1/4 OD y las presiones de servicio hasta 18,9 bar (275 psig), lo cual se ajusta a las dimensiones y requerimientos en el diseño. El tubo de PFA cumple la normativa ASTM D3307, Tipo II, lo cual garantiza un buen desempeño del mismo. Tubo flexible normalmente utilizado en aplicaciones que requieren compatibilidad química y

presiones altas, es una de las mejores opciones para mantener la flexibilidad del modulo e implementar un tipo de tubería resistente. Una de las consideraciones importantes es que sea posible sujetarlo con racores rectos de conexión rápida y que presiones superiores a 200 psi, y este tipo de manguera cumple a cabalidad con los parámetros del diseño.[41]

3.2.5. Válvulas de Aguja.

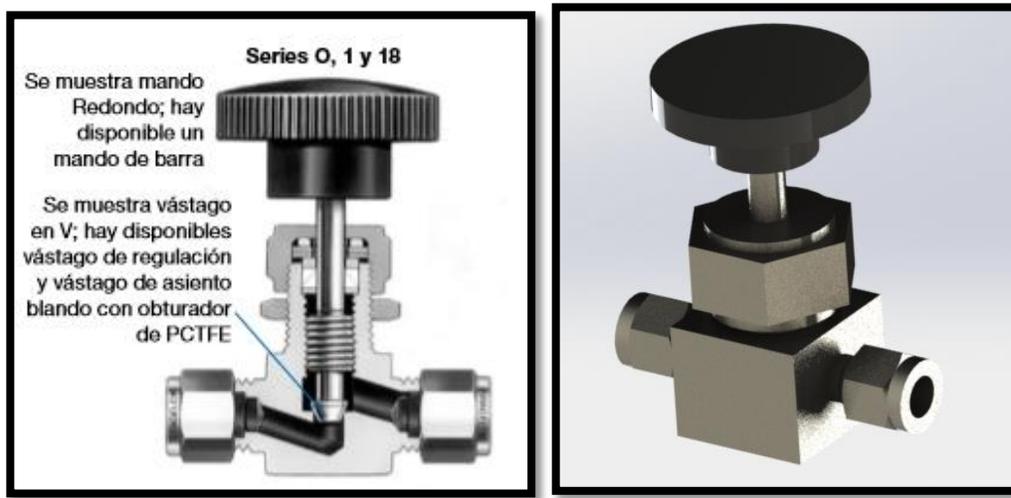


Figura 37. Imagen izquierda, válvula de aguja con bonete integral [42], Imagen derecha, renderizado válvula de aguja.

Las válvulas son de suma importancia en los procesos industriales, tanto así que hoy en día ya se comportan de manera automática, sin necesidad de que un operario las abra y la cierre, un ejemplo de ello son las servo-válvulas. Pero los modelos tradicionales aún se mantienen tales como la válvula de bola o de aguja, pero cada vez en menor medida con lo referente a los procesos industriales.

En la elaboración del módulo se utilizaron válvulas de aguja de múltiples vueltas, serie O y 1 de la marca Swagelok, las cuales poseen los coeficientes de caudal según el número de vueltas, como se presenta en la figura 35. [42]

Este tipo de válvula permite regular el caudal y el flujo que a través de ella pasa, fabricadas casi en su totalidad en acero inoxidable, de muy alta robustez y resistentes. Según los requerimientos de diseño se pidieron con una rosca NPT hembra, para acoplar conectores rápidos en su entrada y salida,

cumpliendo de esta forma con los criterios de flexibilidad anteriormente mencionados.

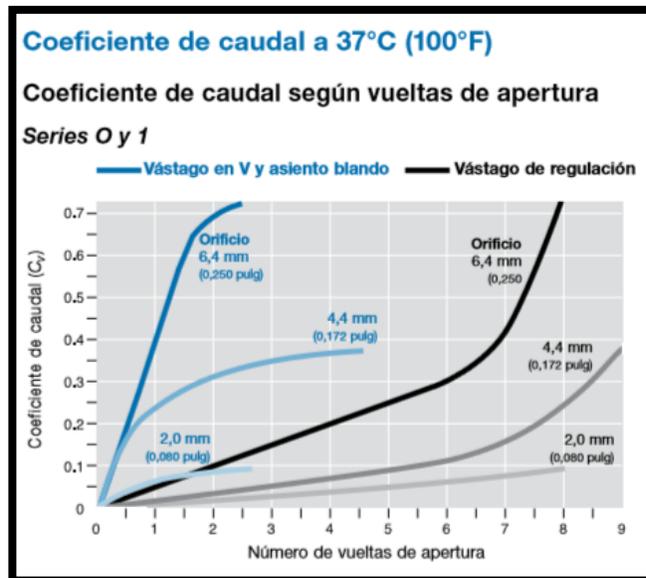


Figura 38. Coeficiente de caudal, válvula de aguja con bonete integral. [42]

3.2.6. Reguladores de Presión.

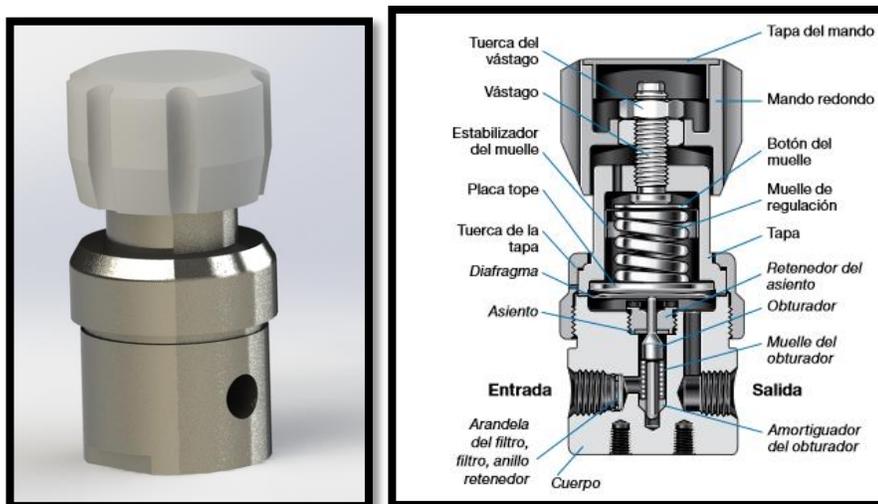


Figura 39. Imagen izquierda, renderizado de un regulador de presión, Imagen derecha, regulador de diafragma para servicio general [43]

Los reguladores son utilizados con el fin de mantener una presión estable en un tramo de la red, para evitar daños por cambios abruptos en la variable de

medida. Estos al igual que las válvulas dependen de un caudal para dejar transitar el fluido a través de sus terminales.

El regulador utilizado para la elaboración del módulo es de tipo diafragma y es utilizado para propósito general, este es de la serie KPR de la marca Swagelok. Consta de un diafragma corrugado, no perforado, el cual permite la regulación del dispositivo de la presión. Posee un filtro de alto caudal y doble malla alojado, y retenido en la conexión de entrada. Posee un coeficiente de caudal de 0,06 y 0,20 y está hecho en su mayoría del acero inoxidable.

Se escogieron dos reguladores de presión de referencias KPR1FJA412A60000 y KPR1GLA412A60000, esta referencia está construida de la siguiente manera: [43]

- KPR corresponde a la serie para reguladores de propósito general.
- 1 está fabricado en acero inoxidable.
- F rango de trabajo de 0 psi a 100 psi. G rango de trabajo de 0 psi a 250 psi.
- J presión máxima de entrada 500 psi. L presión máxima de entrada 1000 psi.
- A configuración de puerta simple.
- 4 entradas de 1/4 NPT hembras.
- 1 material de asiento PCTFE.
- 2 coeficiente de caudal 0.06.
- A mecanismo sensor y de venteo, Diafragma de aleación X-750, sin venteo.
- 6 redondo para montaje en panel.
- 0 sin válvula.
- 0 sin conexión.
- 0 sin manómetro.
- 0 sin opciones.

3.2.7. Filtro Regulador de Presión.

Los filtros reguladores van conectados al suministro de aire con el fin de limpiarlo de toda impureza o humedad que pueda presentarse en cualquier fuente de presión. Los requerimientos para el filtro regulador es que soporte una presión de más de 200 psi y cumpla su función de filtro correctamente.

Las redes de presión de la universidad presentan un nivel de impureza considerable el cual puede ser corrosivo para los instrumentos del módulo y cualquier implementación que involucre este suministro de aire. Este filtro es de marca NORGREN y es de propósito general, con conexiones de 1/2" NPT.



Figura 40. Filtro regulador NORGREN [44]

3.2.8. Suministros de Aire:

El suministro de aire está compuesto por dos sistemas.

3.2.8.1. Sistema de Suministro de Aire de Instrumentos Edificio K

A continuación se presenta un plano con la distribución de la red para el suministro de aire del edificio K en las instalaciones de la universidad.

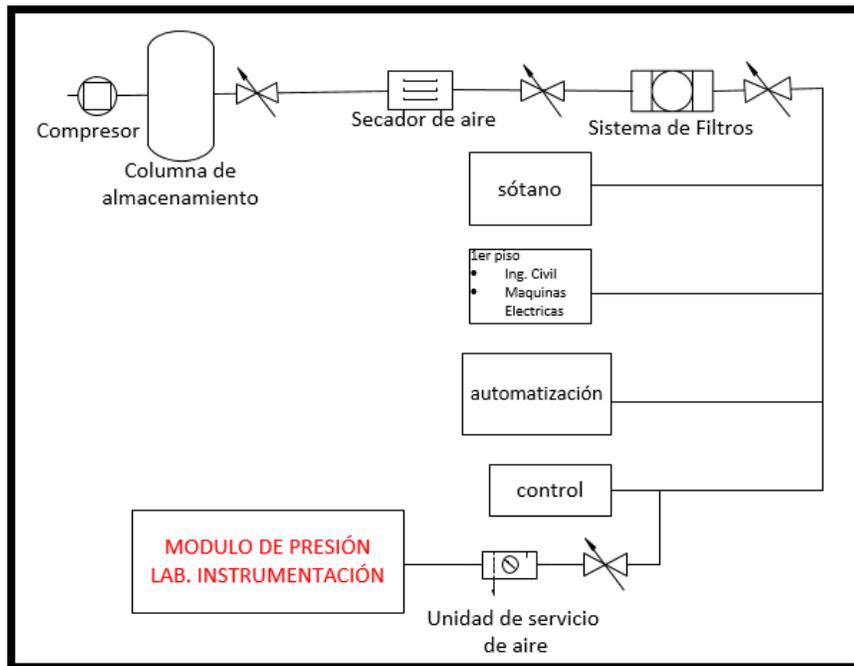


Figura 41. Esquema básico del sistema de suministro de aire de instrumentos, edificio K.

3.2.8.2. Bomba Manual Fluke 700 PTPK.

La bomba manual es muy utilizada en procesos de calibración de manómetros como suministro de aire, ya que además de inyectar una presión considerable al circuito también permite realizar un ajuste fino con cierta exactitud. La bomba manual 700 PTPK de la marca Fluke permite un rango de operación de entre -11.6 psi y 600 psi, lo cual es más que suficiente para llegar a las presiones límites de trabajo del módulo.

El criterio bajo el cual se escogió este dispositivo fue que además de cumplir con los requerimientos en cuanto a los valores de presión, es que es de una marca reconocida en temas de calibración y procedimiento de medición, es confiable, robusta y de fácil manejo.



Figura 42. Imagen izquierda, bomba Fluke 700 PTPK [45],
Imagen derecha renderizado bomba Fluke 700 PTPK

3.2.9. Racor Recto Metálico.

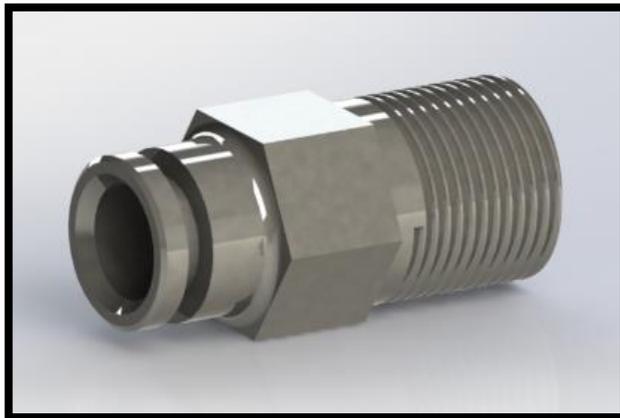


Figura 43. Renderizado final de un racor recto en acero inoxidable

Existen varios tipos de conectores, los cuales cumplen la función de sujetar de manera hermética el tubing o tubo flexible utilizado para interconectar los dispositivos.

Hay racores con un sistema de férula y contraférula el cual se utiliza para trabajos con tubing, es decir, montajes que van a permanecer fijos y sin

modificación alguna. Estos son para aplicaciones específicas por lo cual su implementación es más costosa y de un mayor grado de complejidad al instalarlas. Por otro lado están las conexiones rápidas las cuales se utilizan con el tubo flexible o manguera de ciertos tipos, estos aunque manejan presiones mucho menores que los racores fijos dan una mayor flexibilidad a la hora de movilizar los componentes, al permitir montar y desmontar tramos del lazo como un tipo de rompecabezas.

El racor recto metálico implementado en el módulo de presión fue el conector rápido de acero inoxidable, el cual permite valores de operación entre 0 psi y 220 psi y los diámetros de conexión son 1/4" NPT macho en un extremo y 1/4 OD hembra en el otro.

3.2.10. Fuente Externa de 24 Vdc.



Figura 44. Fuente externa de 24 Vdc, EBCHQ, LP1100D-24M

Para que el lazo de 4 a 20 mA funcione de manera correcta se debe tener una fuente externa de 24 Vdc como alimentación eléctrica. Es aconsejable colocar dispositivos que garanticen la seguridad y eviten cortos, tales como relés de estado sólido. Asegurarse que las protecciones de la fuente están funcionando correctamente. Verificar que se realicen buenas conexiones en el lazo de 4 a 20 mA, para de esta manera evitar inconvenientes futuros.

3.2.11. Calibrador de Procesos Fluke 726.

El calibrador de procesos Fluke 726 ofrece varias ventajas con respecto a otros dispositivos del mismo tipo, una de ellas es su tamaño y comodidad, ya que su peso reducido y su ahorro de espacio son características convenientes a la hora de utilizar este dispositivo en cualquier fase de un proceso o medición. Este multicalibrador a pesar de ser compacto y aparentemente sencillo ofrece la capacidad de generar los parámetros físicos y eléctricos necesarios para considerarlo una herramienta versátil. Para visualizar la información del reporte de calibración y características del dispositivo remitirse al anexo C.



Figura 45. Imagen Izquierda, Calibrador de procesos Fluke 726 [45], Imagen derecha, renderizado calibrador de procesos 726.

Muchos de los parámetros especiales como la medición de RTD's, presión (utilizando módulos), impulsos, alimentación de lazo de 4 a 20 mA, resistor HART, combinación de conmutadores de presión, entre otras, permite corroborar que la adquisición del calibrador de procesos Fluke 726 se realizó acorde con las necesidades. Para la obtención de más información remitirse a la guía básica del dispositivo (capítulo 4).

3.2.12. Módulo de Presión Fluke 700P06.

Los módulos de presión serie 700 de Fluke permiten medir presión con un calibrador de proceso serie 700 de el mismo fabricante, esta es una de las

condiciones iniciales que permitieron la selección de este equipo. En esta aplicación se trabajó con el módulo 700 P 06 ya que el rango de presión inicial de nuestro modulo fue de 100psi, el cual se fue modificando conforme fue avanzando el diseño. Debido a que el rango de este equipo no se puede modificar fue necesario implementarlo en secciones del sistema de presión en donde esta fuera relativamente baja o inferior a 100 psi.

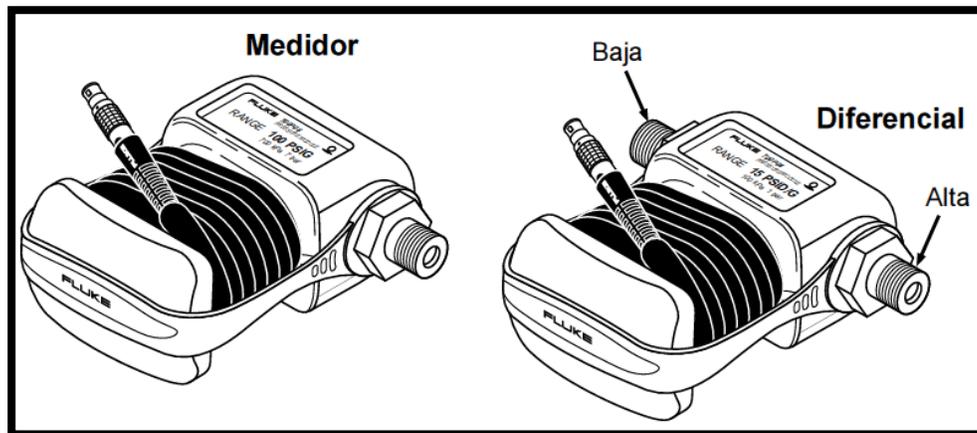


Figura 46. Módulo de presión Fluke 700P06. [46]

El principio de operación de los módulos de presión de la serie 700 se basa en el efecto piezoeléctrico como medio de transducción, esto para convertir la variable presión en valores eléctricos que un convertidor análogo-digital pueda procesar, en este caso el microprocesador interno del dispositivo.

3.2.13. Interfaz USB de Calibración Vía HART DDCON100.



Figura 47. Modem HART DDCON100. [47]

Esta es la referencia del modem que permite la configuración de los transmisores Smar, en las especificaciones del fabricante aconsejan que sea instalado el interfaz DDCON o el CONF401 ya que posee las librerías para el trabajo con los dispositivos HART seleccionados. Este modem con ayuda del software es el que permite intervenir en el lazo de 4 a 20 mA y comunicarse vía HART con los transmisores conectados al lazo. Siendo este módulo de ensayos una aplicación de laboratorio no es necesario adquirir otro tipo de calibradores HART o dispositivos portátiles, ya que con el uso de un computador con Windows o Linux se puede acceder a la información que suministran los transmisores.

3.3. DISEÑO DEL MÓDULO Y CIRCUITO BASICO DE ENSAYO.

Un constante en cuanto a los al diseño e implementación módulos didácticos con fines académicos, es que cumplan con las normatividad existente y que posean los requerimientos de seguridad con el fin de evitar accidentes, para el diseño del módulo de ensayo para la medición de la variable presión, con la implementación de un circuito básico de presión relativa, se tuvo en cuenta una serie de experiencias y recomendaciones brindadas por los entes rectores de la metrología en Colombia y en el departamento de Santander, estamos hablando del Instituto Nacional de Metrología o INM y el Instituto Colombiano de Petróleos o ICP. Los institutos anteriormente mencionados poseen laboratorios de calibración debidamente certificados, los cuales poseen todas las condiciones para que los procesos de medición y calibración puedan considerarse exitosos.

Los dispositivos de trabajo para presión tales como válvulas, reguladores de presión, conexiones y conexiones rápidas están cobijados por la Directiva de Equipos a Presión (PED) 97/23/EC, las cuales hacen referencia a las legislaciones sobre los equipos de presión en Europa y en la cual se basa el proveedor Swagelok para la fabricación de sus productos. Otros dispositivos de medición como los manómetros con glicerina deben cumplir con los requisitos de seguridad impuestos por las normas ASME B40.1 y EN 837-1, las cuales comprenden los estándares de producción, uso y aplicación de manómetros.

Los equipos utilizados en este módulo de ensayo para la medición de la variable presión, fueron fabricados según la normatividad correspondientes. Los fabricantes y proveedores de estos elementos son referentes a nivel nacional en temas de medición y calibración de instrumentos, lo cual brinda

confiabilidad a la hora de implementar cada uno de estos elementos. La marca Fluke es una de ellas, el módulo cuenta con un calibrador de procesos Fluke 716, un módulo de presión Fluke 700p06 y un osciloscopio Fluke 123, cada uno de estos dispositivos vienen garantizados por esta marca y cuentan con certificados que sustentan la fiabilidad de su medida. Otro de los fabricantes es Smar, la cual es muy reconocida en el sector industrial por sus transmisores y transductores los cuales combinan robustez, sencillez y confiabilidad, y de la cual se adquirieron dos transmisores indicadores, uno para presión relativa y otro para presión diferencial. Estos transmisores cuentan con la ventaja de que son recalibrables, programables y ajustables de manera remota, sin interrumpir o parar el proceso en el cual estén involucrados. La información disponible en cuanto a las características técnicas y normatividad, es uno de los factores que influyó en la escogencia de estos dispositivos para el diseño.

Con el uso de los dispositivos ya antes mencionados, se diseñó una red de presión que permite el trabajo con los diferentes tipos de medidores. Se creó una red de manómetros de tubo Bourdon colocados en serie y con un difusor al final, lo cual permite realizar mediciones teniendo en cuenta las diferentes resoluciones. Este procedimiento permite analizar desde el punto de vista experimental, como varía el proceso de medición dependiendo de la escala de los manómetros. La medición de los manómetros se debe comparar con los instrumentos más confiables como los transmisores Smar LD 291, LD 301 y el módulo de presión Fluke 700p06, siendo este último tomado como instrumento patrón, ya que cuenta con un certificado de calibración Fluke el cual nos brinda una gran seguridad en la medida.

Otro de los aspectos importantes en la elaboración del diseño fue la creación del lazo 4 a 20 mA con comunicación HART, ya que teniendo en cuenta lo popular que este protocolo es en la industria y las ventajas que posee. Es de mucha importancia que en la experiencia con el módulo el usuario se relacione con este protocolo, ya que es el que permite la calibración y ajuste de los transmisores de manera remota y no invasiva. La aplicación del lazo de 4 a 20 mA con protocolo HART, se implementó con la topología de conexión activa para transmisores HART, la cual requiere de una fuente externa de 24 Vdc para alimentar el circuito. Este tipo de conexiones soportan hasta 16 dispositivos en modo multidrop, y permite monitorear distintas variables de diferentes transmisores al mismo tiempo.

3.3.1. Criterios de Diseño.

En la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, había debilidades a la hora de aplicar lo aprendido en los cursos de instrumentación industriales y áreas afines relacionadas con la medición de variables de proceso. Teniendo en cuenta lo anterior se optó por realizar el diseño de un módulo de presión y la implementación de un circuito básico que reuniera características con lo referente a calibración y ajuste de equipos de medición y el censado de variables de proceso de forma correcta.

3.3.1.1. Condiciones Ambientales.

Las condiciones ambientales del laboratorio de instrumentación deben ser las adecuadas y apuntan a cumplir las normas ISO17025 e ISO9001, las cuales describen condiciones ambientales que debe tener un laboratorio de ensayos y calibraciones, dadas las complicaciones que implican condiciones, lo realizado en el laboratorio de instrumentación solo es una aproximación a lo que plantea la norma. Ya que uno de los objetivos es que los estudiantes relacionen dispositivos que encontraran en el campo laboral, estos se escogieron con un grado de robustez significativo, con el fin de que emularan el trabajo en campo en un ambiente controlado. El módulo de ensayo de la variable presión debe ser un espacio aislado, con mucho hermetismo y manipulado por personal capacitado para que así las fuentes de error sean mínimas.

3.3.1.2. Equipos y Dispositivos de Medición.

a. Transmisores Smar LD 291 y Smar LD 301.

El cumplimiento de las normas es un factor que siempre ha preocupado al sector industrial y para que un dispositivo pueda operar en ciertos ambientes de trabajo, debe cumplir una serie de normas que lo acreditan como confiable en diferentes entornos. Según la información del fabricante los transmisores utilizados poseen las siguientes características técnicas:

- Información de la directiva Europea

Representante autorizado en la Comunidad Europea Smar-Gmbh
Rheingaustrasse 9-55545 mal Kreuzanach. [37][38]

Directiva PED (97/23/EC) - Directiva de equipos a presión. Este producto cumple con la Directiva, fue diseñado y fabricado de acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería con varios estándares de ANSI, ASTM, DIN y JIS. [37][38]

Directiva EMC (2004/108/CE) - Compatibilidad electromagnética. La prueba de EMC se realizó de acuerdo a la norma IEC: IEC61326-1: 2006, IEC61326-2-3: 2006, IEC61000-6-4:2006, IEC61000-6-2: 2005. Para uso exclusivo en el entorno. [37][38]

Directiva ATEX (94/9/CE) - Equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. Este producto ha sido certificado según las normas europeas en NEMKO y el examen (antiguo DMT). El organismo de certificación para la evaluación de la calidad de fabricación es el examen (número 0158). [37][38]

LVD 2006/95/CE - material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión. Según la directiva LVD anexo II del equipo bajo ATEX "Equipos eléctricos para uso en atmósferas explosivas".[37][38]

- Certificados de aéreas peligrosas.

Intrínsecamente seguro (FM, CSA, NEMKO, EXAM, CEPEL, NEPSI), a prueba de explosión (FM, CSA, NEMKO, CEPEL, NEPSI), a prueba en polvo (FM) y no inflamables (FM). [37][38]

b. Módulo de presión Fluke 700p06.

En todo proceso de calibración y ajuste debe tenerse un instrumento patrón para garantizar que la lectura de las herramientas de medición son confiables y poder observar cual es la desviación del dispositivo en la medida. En nuestro módulo de ensayos es este el instrumento patrón con el cual se comparan las medidas y poder calcular la incertidumbre y varios tipos de error. La información que garantiza que este instrumento puede ser utilizado como instrumento patrón es el certificado de calibración que emite el fabricante, el cual se encuentra en el anexo A.

3.3.1.3. Aspecto Ergonómico del Diseño.

Es importante resaltar que la estética, el orden y sobre todo la robustez juegan un papel significativo a la hora de implementar el diseño, por lo cual uno de los requerimientos es que la mayoría de los elementos y dispositivos sean de acero inoxidable, este material es resistente a la corrosión y de muy buen aspecto. El marco estructural es en acero y guarda uniformidad con la estructura de otros bancos y módulos del laboratorio de instrumentación, las barras de sujeción de dispositivos son de acero semblanteado, y por último los soportes de las válvulas y los reguladores son hechos en acero cepillado. Estas condiciones de diseño además de brindar un aspecto de limpieza y buena presentación también garantizan la robustez y durabilidad del módulo. Para mayor visualización sobre el diseño y sus especificaciones remitirse al anexo G donde se muestra la planimetría del diseño.

3.3.2. Tipos de Prueba:

3.3.2.1. Pruebas de Repetibilidad e Histéresis.

El desarrollo de un de mediciones descendentes y ascendentes nos permite verificar la histéresis de los instrumentos al tomar los datos en varios puntos y graficarlos en varios puntos. La medición de la respetabilidad y la histéresis están entre los aspectos más importantes de la experiencia, ya que su análisis y comprensión permiten entender de una mejor manera la dinámica de los instrumentos de medición.

3.3.2.2. Preload.

La realización de un PRELOAD es de mucha importancia, ya que permite reactivar la dinámica de los dispositivos después de periodos no utilización y realizarlo en el módulo permite seguir los estándares y tendencias que se aplican en la industria diariamente. Realizar este procedimiento minimiza aún más las fuentes de error y permite que los manómetros y demás dispositivos del medida confiables.

3.3.2.3. Prueba de Estanqueidad.

Otro tipo de pruebas realizadas es la prueba de estanqueidad para dispositivos de presión neumática, la cual por su naturaleza nos permite determinar cuándo

hay una fuga en los tramos del lazo de presión, permitiendo así un oportuno mantenimiento o corrección de problemas. Consiste en aplicar una presión a la línea de calibración durante determinado tiempo, si en ese tiempo la presión se mantiene significa que el tramo del lazo está libre de fugas y sellado de manera hermética.

3.3.2.4. Pruebas de Ajuste y Medición Utilizando el Lazo de 4 a 20 mA con Protocolo HART.

El lazo de 4 a 20 mA con comunicación HART permite acceder y modificar parámetros de los transmisores de forma remota, la prueba realizada consiste en cambiar parámetros del medidor de presión y analizar su comportamiento, además de realizar el almacenamiento de datos en documentos tipo Excel para luego analizarlos y compararlos con los de demás datos obtenidos durante la experiencia. También se analizaran estos datos en pruebas de respetabilidad e histéresis.

3.3.3. Diseño Mecánico del Módulo.

Fue utilizado el software SolidWorks el cual es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico basado en parámetros y medidas. Esta herramienta es de un amplio uso en el diseño de sistemas mecánicos, porque permite el diseño y ensamble de piezas, diseño de tuberías, circuitos, herramientas de renderizado, entre otras. Cada pieza en el módulo fue diseñada con ayuda de este software basado en el diseño de croquis, manejo de planos y las operaciones de extrusión de salientes y cortes, redondeo, revoluciones, por mencionar algunas. Cabe señalar que el módulo de ensayo fue diseñado a escala real. Para visualizar las dimensiones del diseño remitirse al anexo G.

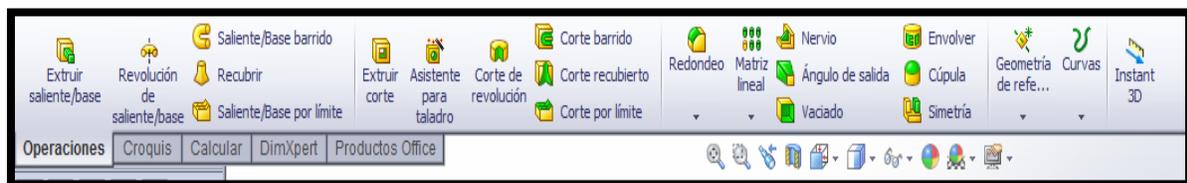


Figura 48. Operaciones para diseño de sólidos, SolidWorks.

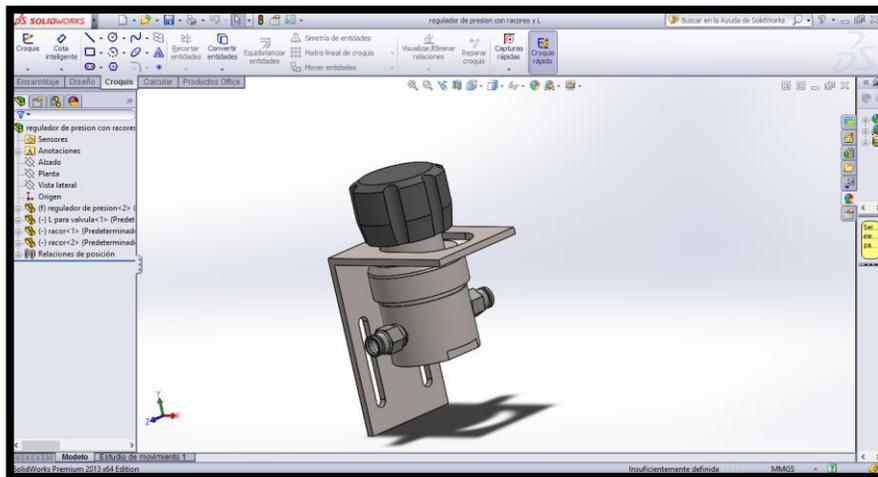


Figura 49. Herramientas de croquizado, tomada del software SolidWorks.

Este software permite visualizar el acabado final de las estructuras y los dispositivos diseñados agregándoles texturas disponibles en las librerías. También es posible interconectar las piezas a través de uno o varios ensambles, para facilitar el trabajo de diseño en piezas con un alto grado de complejidad. Para observar las diferencias entre la imagen de un objeto real y un diseño tipo CAD, remitirse al anexo H.

La herramienta de renderizado es la última de las herramientas que se utiliza en el diseño mecánico del módulo, ya que esta permite hacer una aproximación de cómo se vería el módulo en la realidad teniendo en cuenta las proporciones, las formas y texturas utilizadas. Esta visión se puede realizar desde cualquier ángulo.



Figura 50. Renderizado final del módulo de presión.

3.4. Sistema de Adquisición de Datos.

En el diseño de la primera fase del módulo de ensayo de la variable de presión que se realizó, solo se cuenta con una señal de información que es la suministrada por el transmisor indicador de presión LD291. La cual se adquiere a partir de un lazo de corriente 4 a 20 mA, esto no quiere decir que sea la única señal que se manejara en este módulo ya que se tiene pensado a futuro implementar un sistema en donde la mayoría de las válvulas manejen señales eléctricas y adquirir equipos que permitan ampliar este circuito de presión y por ende manejar más señales de información.

Es por esto que en principio solo se propone el uso del módulo de entrada de corrientes análogas NI 9203 de National Instrument, se optó por este dispositivo en primera instancia por las cualidades que brinda para nuestra necesidad y las que nos puede brindar en las próximas fases con la adquisición de nuevos equipos; y en segunda por las licencias que ya se tienen en la universidad para manejo de programas que permiten la implementación del sistema.

En el momento de adquirir cualquier modulo para el sistema de adquisición de datos, se hace necesario implementar un chasis de este mismo fabricante, quien hace posible principalmente la comunicación del módulo de entradas y un computador.

En este caso se propone el NI cDAQ-9174, que es un chasis de 4 ranuras, lo que permite alojar 4 módulos, brindando con esto la posibilidad de la ampliación del circuito lo cual hace parte de este proceso.

Para este sistema ya se adquirió un computador con las capacidades adecuadas para la gestión y almacenamiento de la información captada en todo este proceso.

A continuación se presentan las descripciones de los equipos propuestos dadas por los fabricantes y una tabla con la respectiva cotización.

3.4.1. NI 9203, Modulo de Entradas de Corriente Analogica de 8 canales de 16 bits, ± 20 mA, 200 kS/s.

El NI 9203 es un módulo de adquisición de datos de la Serie C que incluye ocho canales de entrada de corriente analógica para aplicaciones de alto rendimiento de control y monitoreo.

Tiene rangos de entrada programable de ± 20 mA o 0 a 20 mA, resolución de 16 bits y una velocidad de muestro máxima de 200 kS/s. Para protegerse contra señales transitorias, el NI 9203 incluye doble barrera de aislamiento (250 Vrms) de canal a tierra para seguridad e inmunidad a ruido.



Figura 51. Módulo de adquisición de datos, National Instrument NI 9203 [48]

3.4.2. NI cDAQ-9174, Chasis NI CompactDAQ USB 4 Ranuras.



Figura 52. NI cDAQ-9174, Chasis NI CompactDAQ USB 4 Ranuras. [49]

El NI cDAQ-9174 es un chasis NI CompactDAQ USB de 4 ranuras diseñado para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas. Combine

el cDAQ-9174 con hasta cuatro módulos de E/S de la Serie C para un sistema de medidas personalizado de entrada analógica, salida analógica, E/S digital y contadores/temporizadores.

Los módulos están disponibles para una variedad de medidas de sensores incluyendo termopares, RTDs, galgas extensiométricas, transductores de presión y carga, celdas de torsión, acelerómetros, medidores de flujo y micrófonos. Los sistemas NI CompactDAQ combinan medidas de sensores con señales de voltaje, corriente y digital para crear sistemas personalizados de señal mixta con un solo cable USB a la PC o laptop.

El cDAQ-9174 tiene cuatro contadores/temporizadores integrados de 32 bits de uso general. Usted puede tener acceso a estos contadores a través de un módulo digital de la Serie C instalado y temporizado por hardware como el NI 9401 o NI 9402 para aplicaciones que involucran codificadores de cuadratura, PWM, conteo eventos, generación de series de pulso y medidas de periodo o de frecuencia.

3.4.3. Inspiron One 2330 con Energy Star 5.2.



Figura 53. Ordenador Inspiron One 2330 con Energy Star 5.2

En esta fase del proyecto se adquirió un computador marca DELL, en donde se tiene montado el software del DDCON100 para el protocolo HART del transmisor, en donde se hace gestión de datos y en el cual se montaran las herramientas necesarias para la adquisición de datos que se propone. En el anexo E. se presentan las características de este equipo en la cotización que se realizó para adquirirlo.

3.4.4. Cotización del Sistema de Adquisición de Datos

COTIZACION EQUIPOS DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA EL MODULO DE MEDIDA DE LA VARIABLE PRESION				
CANT.	DESCRIPCIÓN	National Instrument	DELL	TOTAL
1	NI 9203 Módulo de Entrada de Corriente Analógica de 8 Canales	\$ 1.244.000.00	\$ 0.00	\$ 1.244.000.00
1	NI cDAQ-9174 Chasis NI CompactDAQ USB de 4 Ranuras	\$ 1.629.000.00	\$ 0.00	\$ 1.629.000.00
1	Computador	\$ 0.00	\$ 2.080.386.00	\$ 2.080.386.00
			SUBTOTAL	\$ 4.953.386.00
			TOTAL	\$ 5.745.927.76

Tabla 2. Cotización Sistema de Adquisición de datos.

4. MANUAL Y GUÍA DE LABORATORIO.

4.1. Manual del calibrador de Proceso 726 Fluke + Módulo 700P06.

4.1.1. Calibrador de Proceso 726 Fluke.

En esta sección se presenta la información del transmisor referenciada toda al manual del equipo, en donde se realizó un resumen que presenta solo las herramientas que brinda para trabajar con la variable presión y las aplicaciones relacionadas a la generación de corriente 4 a 20 mA.

Si se desea ampliar la información entorno a todas las herramientas que brinda el calibrador puede hacerse a el manual descargándolo de manera gratuita en la página del fabricante desde el siguiente enlace.
<http://www.fluke.com/Fluke/coes/Support/Manuals/default.htm?ProductId=56117>



Figura 54. Calibrador multifuncional de procesos, Fluke 726. [51]

Es un calibrador de procesos muy cómodo por su tamaño, fácil de utilizar por la distribución de funciones en su teclado y las lecturas que proporciona en su pantalla dual.

Es un equipo alimentado con baterías, tiene la capacidad de medir y generar los parámetros eléctricos y físicos que se aprecian en la siguiente tabla:

Función	Mide	Genera
V cc	0 V a 30 V	0 V a 20 V
mA cc	0 a 24 mA	0 a 24 mA
Frecuencia	2 CPM a 15 kHz	2 CPM a 15 kHz
Resistencia	0 Ω a 4000 Ω	5 Ω a 4000 Ω
Termopar	Tipos E, J, K, T, B, R, S, L, U, N, C, XK, BP	
RTD (termodetectores de resistencia)	Pt100 Ω (385) Pt100 Ω (3926) Pt100 Ω (3916) Pt200 Ω (385) Pt500 Ω (385) Pt1000 Ω (385) Ni120 (672) CU10	
Presión	29 módulos desde 1 pulg. H ₂ O hasta 10.000 psi	
Impulso	1 a 100.000 Frecuencia máxima de 10 kHz	1 a 10.000 Rango de frecuencia de 2 CPM a 10 kHz
Otras funciones	Alimentación de lazo, resistor HART, comprobación de conmutadores de presión, escalonamiento, rampa, memoria, compensación unión fría.	

Tabla 3. Resumen funciones de fuente y medición [51]

Medida de presión:

Rango	Resolución	Exactitud	Unidades
Determinado por el módulo de presión	5 dígitos	Determinado por el módulo de presión	psi, inH ₂ O@4 °C, inH ₂ O@20 °C, kPa, cmH ₂ O@4 °C, cmH ₂ O@20 °C, bar, mbar, kg/cm ₂ , mmHg, inHg

Tabla 4. Parámetros de medida para presión [51]

Teniendo presente los parámetros eléctricos y físicos que podemos trabajar, procedemos a conocer la distribución de la pantalla y como se presenta la información en el calibrador. Para esto se presenta la imagen:

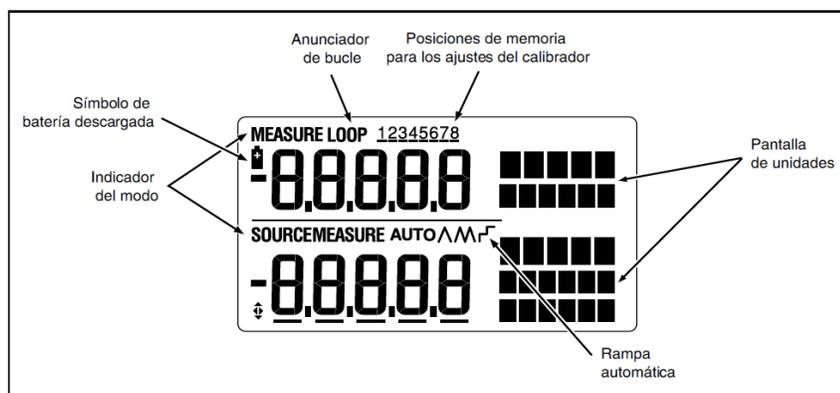
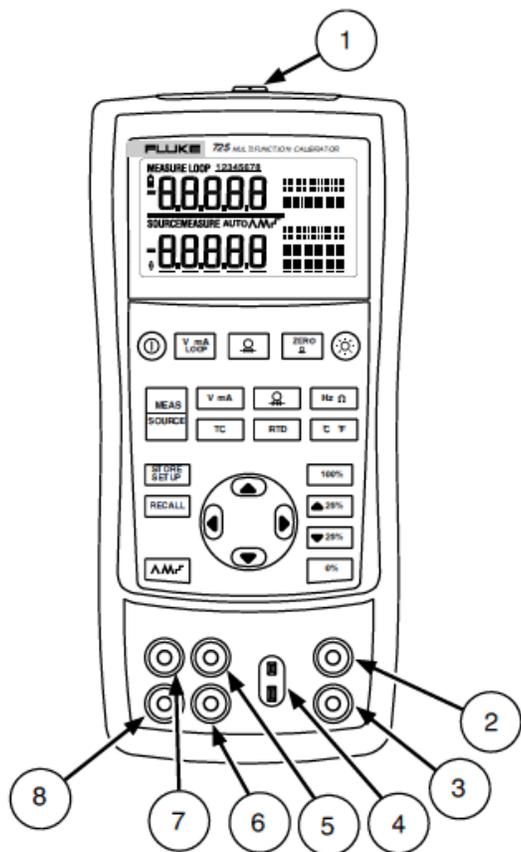


Figura 55. Pantalla calibrador de procesos Fluke 726. [51]

Ahora se presenta cada uno de los exteriores que encontramos en el equipo y la función de cada uno en el equipo y la configuración que nos permite hacer en este. Para esto se presenta las siguientes imágenes y tablas de información:



Nº	Nombre	Descripción
①	Conector del módulo de presión	Conecta el calibrador a un módulo de presión o a un ordenador para conexión a control remoto.
②, ③	Terminales MEASURE V, mA	Terminales de entrada para la medición de tensión, corriente y el suministro de alimentación de bucle.
④	Entrada/salida TC	Terminal para la medición o simulación de termopares. Este terminal acepta conectores machos miniatura, polarizados de termopar con patillas planas, en línea con separación de 7,9 mm (0,312 pulg.) entre centros.
⑤, ⑥	Terminales SOURCE/MEASURE V, RTD, Hz, Ω	Terminales para fuente o medición de tensión, resistencia, frecuencia y RTD.
⑦, ⑧	Terminales SOURCE/MEASURE mA y 3W, 4W	Terminales para fuente y medición de corriente y para realizar mediciones de RTD con 3W y 4W (3 y 4 conductores).

Figura 56. Conectores y terminales, Fluke 726. [51]

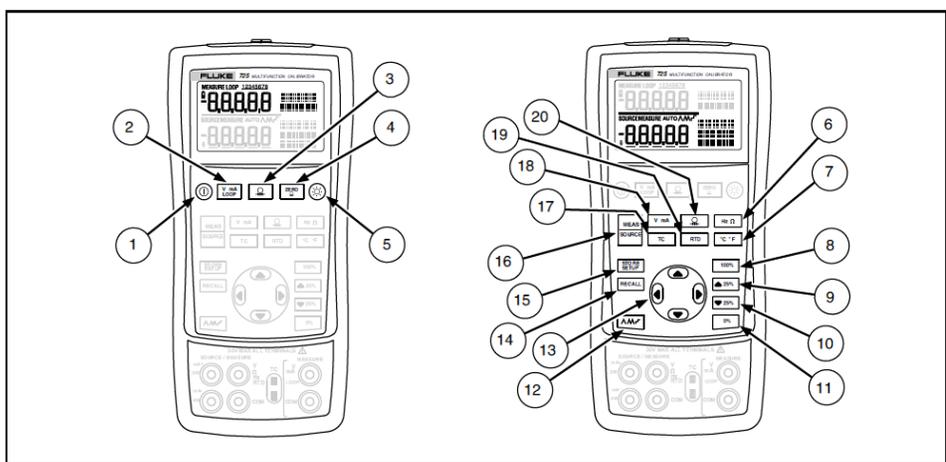


Figura 57. Teclas. [51]

Nº	Nombre	Descripción
①		Enciende y apaga la alimentación.
②		Selecciona tensión, mA o alimentación de bucle como la función de medición en la parte superior de la pantalla.
③		Selecciona la medición de presión en la parte superior de la pantalla. Pulsándola repetidamente avanza cíclicamente por las diferentes unidades de presión.
④		Pone a cero la lectura del módulo de presión. Esto es válido para ambas pantallas, superior e inferior.
⑤		Enciende o apaga la retroiluminación. Activa el modo Ajuste del contraste durante el encendido.
⑥		Conmuta las funciones de medición y fuente de frecuencia y ohmios.
⑦		Conmuta entre grados centígrados o Fahrenheit al estar activas la funciones TC o RTD.
⑧		Recupera de la memoria un valor de fuente correspondiente al 100 % de la amplitud y lo fija como el valor de fuente. Púlsela y sosténgala pulsada para guardar el valor de fuente como el valor del 100 %.
⑨		Incrementa la salida en el 25 % de la amplitud.
⑩		Decrece la salida en el 25 % de la amplitud.
⑪		Recupera de la memoria un valor de fuente correspondiente al 0 % de la amplitud y lo fija como el valor de fuente. Púlsela y sosténgala pulsada para guardar el valor de fuente como el valor del 0 %. Identifica la versión del Firmware. Mantenga presionado durante el encendido.

Tabla 5. Función de teclas a. [51]

Nº	Nombre	Descripción
⑫		Avanza cíclicamente a través de: Repetición lenta de rampa 0 % -100 % - 0 % Repetición rápida de rampa 0 % -100 % - 0 % Repetición de rampa 0 % -100 % - 0 % con escalonamiento de 25 %
⑬		Desactiva el modo Apagado automático
⑬		Activa el modo Apagado automático
⑬		Incrementa o decrece el nivel de fuente. Avanza cíclicamente a través de las selecciones 2, 3 y 4 conductores. Avanza a través de las posiciones de memoria de los ajustes del calibrador. En modo Ajuste del contraste; la flecha hacia arriba oscurece el contraste y la flecha hacia abajo, lo aclara.
⑭		Recupera un ajuste previo del calibrador desde una posición de memoria.
⑮		Guarda los ajustes del calibrador. Guarda la configuración de Ajuste del contraste.
⑯		Avanza cíclicamente el calibrador a través de los modos MEASURE y SOURCE en la parte inferior de la pantalla.
⑰		Selecciona la función medición y fuente TC (termopar) en la parte inferior de la pantalla. Pulsándola repetidamente avanza cíclicamente a través de los tipos de termopares.
⑱		Conmuta entre las funciones fuente de tensión o mA y simulación de mA en la parte inferior de la pantalla.
⑲		Selecciona la función medición y fuente de RTD (detectores termométricos de temperatura) en la parte inferior de la pantalla. Pulsándola repetidamente avanza cíclicamente a través de los tipos de RTD.
⑳		Selecciona la función medición y fuente de presión. Pulsándola repetidamente avanza cíclicamente por las diferentes unidades de presión.

Tabla 6. Función de teclas b. [51]

Teniendo la información básica de los exteriores del equipo, la distribución de la pantalla y una idea de los alcances del equipo, se presenta a continuación una guía de uso y aplicaciones referenciada al manual del equipo.

4.1.1.1. Funcionamiento Básico:

En esta sección se permite abordar algunas operaciones básicas del calibrador. A continuación se hará una prueba tensión a tensión, en donde lo que se busca es medir con el instrumento una tensión que es generada por el mismo. Y se almacenan dos valores de voltajes que serán el 0% y 100% de la fuente.

1. Conecte la salida de tensión del calibrador a su entrada de tensión tal como se muestra en la figura 53. [51]
2. Pulse  para encender el calibrador. Pulse  para seleccionar tensión corriente continua en la parte superior de la pantalla. [51]
3. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE en la parte inferior de la pantalla. El calibrador está midiendo tensión corriente continua y usted puede ver las mediciones activas en la parte superior de la pantalla. [51]
4. Pulse  para seleccionar fuente de tensión corriente continua. [51]
5. Pulse  y  para seleccionar un dígito a cambiar. Pulse  para seleccionar 1 V para el valor de salida. Pulse y sostenga pulsada  para introducir 1 V como el valor correspondiente a 0 %.[51]
6. Pulse  para incrementar la salida a 5 V. Pulse y sostenga pulsada  para introducir 5 V como el valor correspondiente al 100 %.[51]
7. Pulse  y  para desplazarse entre 0 y 100 % en pasos con incremento del 25 %.[51]

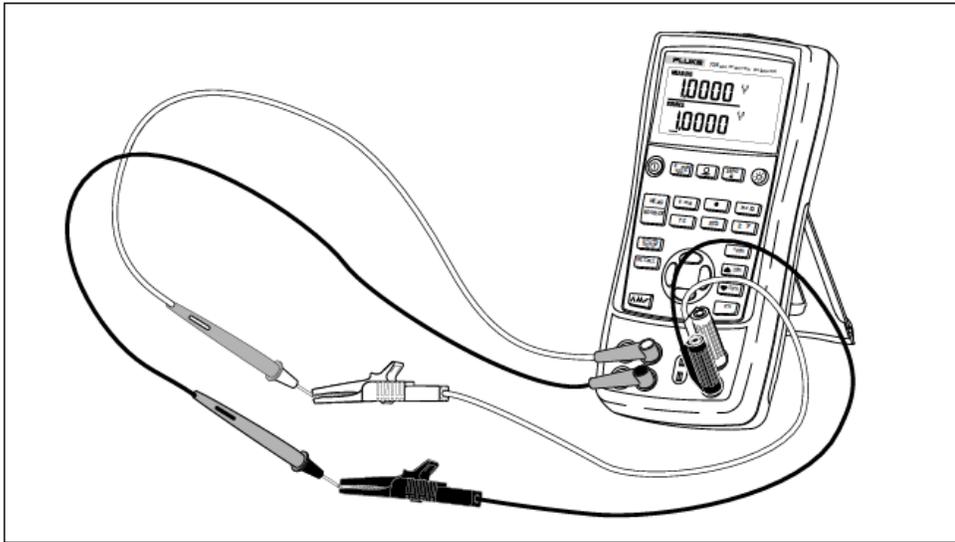


Figura 58. Conexión para generar y medir una misma tensión. [51]

4.1.1.2. Utilización del Modo Measure Medición de Parámetros Eléctricos en la Parte Superior de la Pantalla.

Para medir la corriente o tensión de un transmisor o para medir la salida de un instrumento de presión, utilice la parte superior de la pantalla y proceda como sigue:

1. Pulse $\frac{V}{mA}$ $\frac{Loop}{Loop}$ para seleccionar tensión o corriente. LOOP no debe estar activa. [51]
2. Conecte los conductores tal como se muestra en la figura 54. [51]

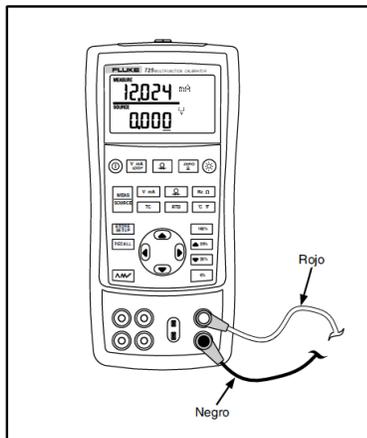


Figura 59. Conexión para medir tensión y corriente. [51]

4.1.1.3. Medición de Corriente con Alimentación de Bucle.

La función alimentación de bucle activa una fuente de 24 V en serie con el circuito de medición de corriente, permitiendo así probar un transmisor cuando está desconectado del cableado de la planta. Para medir la corriente con la alimentación de bucle, proceda como sigue:

1. Conecte el calibrador a los terminales del bucle de corriente del transmisor tal como se muestra en la figura 55. [51]
2. Pulse  mientras el calibrador esté en el modo de medición de corriente. LOOP aparece y una fuente interna de bucle de 24 V se enciende. [51]

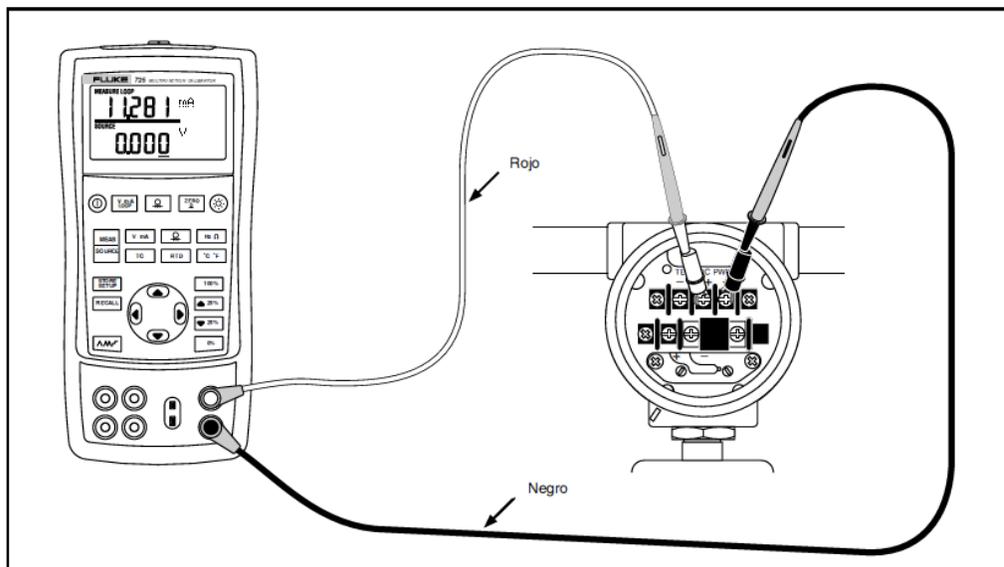


Figura 60. Conexión para medir corriente y Suministrar alimentación de lazo. [51]

4.1.1.4. Medición de Parámetros Eléctricos en la Parte Inferior de la Pantalla.

Para medir parámetros eléctricos utilizando la parte inferior de la pantalla, proceda como sigue:

1. Conecte el calibrador tal como se muestra en la figura 56. [51]

2. Si es necesario, pulse  para activar el modo MEASURE activación de la parte inferior de la pantalla. [51]
3. Pulse  para tensión o corriente continua, o  para frecuencia o resistencia. [51]

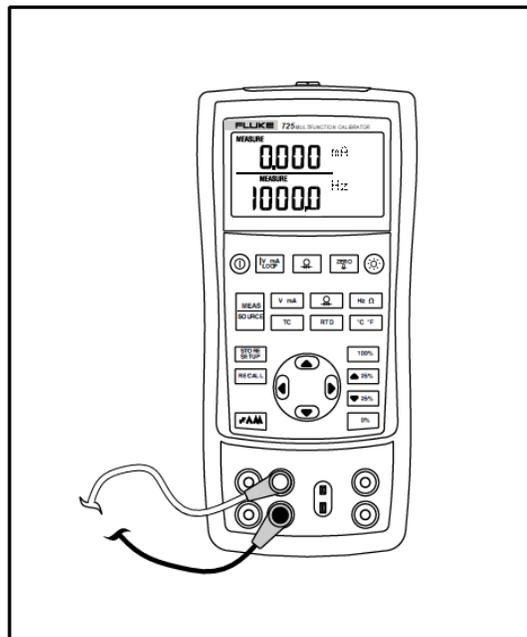


Figura 61. Conexión para medir parámetros eléctricos, Parte inferior de la pantalla. [51]

4.1.1.5. Medición de Presión.

Fluke tiene disponibles módulos de presión en una variedad de tipos y rangos. Los módulos varían en el uso, el medio y la exactitud. La figura 57 muestra los módulos de medición y de presión diferencial. Los módulos diferenciales también trabajan en el modo de medición al dejar el acoplamiento de baja presión abierto a la atmósfera. [51]

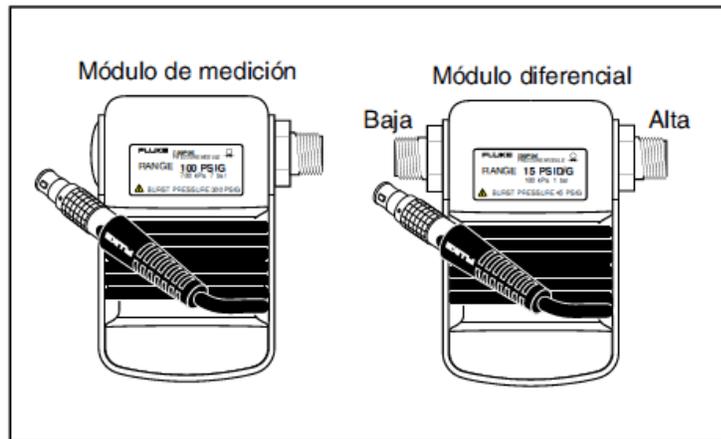


Figura 62. Módulos de presión Fluke 700. [51]

Para tomar medidas de presión, conecte el módulo de presión adecuado para la presión de proceso a probar y proceda como sigue:

1. Conecte el módulo de presión al calibrador tal como se muestra en la figura 58. Las roscas en los módulos de presión aceptan accesorios para tubería estándar ¼ NPT. Si es necesario, utilice el adaptador de ¼ NPT a ¼ ISO suministrado. [51]
2. Pulse  El calibrador detecta automáticamente cuál módulo de presión está conectado y fija automáticamente el rango correspondiente. [51]
3. Ponga a cero el módulo de presión tal como se describe en la hoja de instrucciones del módulo. El procedimiento para poner a cero los módulos cambia dependiendo del tipo de módulo, pero todos requieren que se pulse la tecla  Si lo desea, continúe pulsando  para cambiar las unidades de presentación de la presión a psi, mmHg, inHg, cmH₂O a 4°C, cmH₂ a 20°C, inH₂O a 4°C, inH₂O a 20°C, mbar, bar, kg/cm², o kPa. [51]

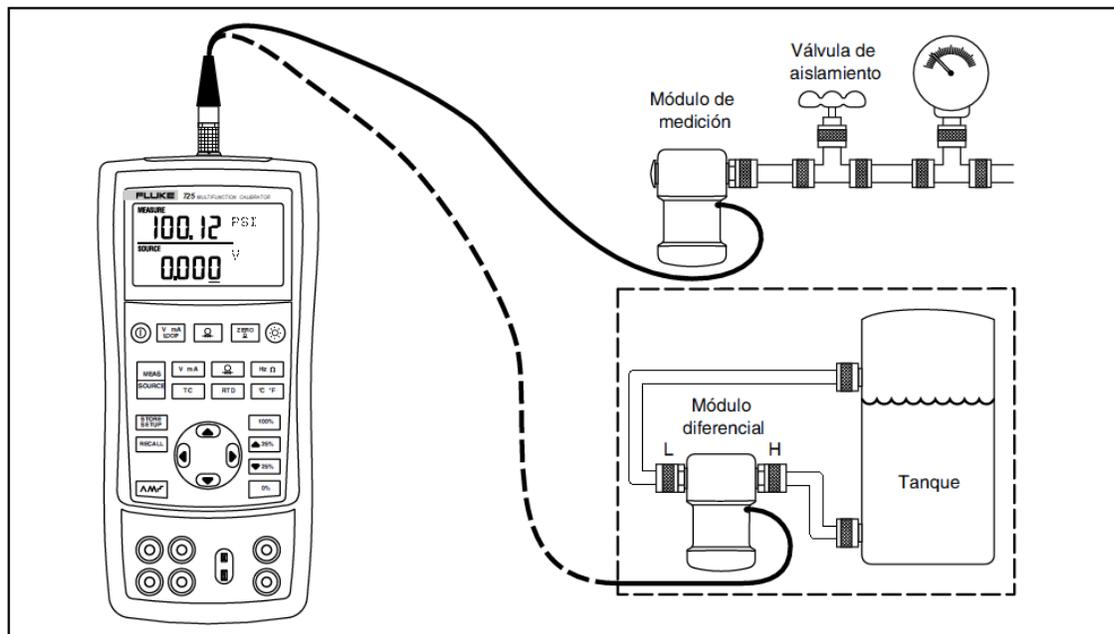


Figura 63. Conexión de módulo para medir presión. [51]

4.1.1.6. Puesta a Cero con Módulos de Presión Absoluta.

Para poner a cero, ajuste el calibrador para leer una presión conocida. Ésta puede ser la presión barométrica, si se conoce con precisión.

Un patrón de presión preciso puede aplicar una presión dentro del rango para cualquier módulo de presión absoluta. Para ajustar la lectura del calibrador, proceda de la siguiente manera: [51]

1. Pulse  aparecerá REF Adjust a la derecha de la lectura de presión. [51]
2. Utilice  para aumentar la lectura del calibrador, o  para disminuirla, a fin de igualar la presión de referencia. [51]
3. Pulse  nuevamente para abandonar el procedimiento de puesta a cero. El calibrador guarda y vuelve a utilizar automáticamente la compensación de corrección del cero para un módulo de presión absoluta por tanto, no es necesario volver a poner a cero el módulo cada vez que lo utilice. [51]

4.1.1.7. Utilización del Modo Source.

En el modo SOURCE, el calibrador genera señales calibradas para probar y calibrar instrumentos de proceso; suministra tensiones, corrientes, frecuencias y resistencias; simula la señal eléctrica de salida de detectores de temperatura por RTD o termopar; y mide la presión de gas de una fuente externa, creando una fuente de presión calibrada. [51]

4.1.1.8. Fuente de Corriente de 4 a 20 mA.

Para seleccionar el modo fuente de corriente proceda como sigue:

1. Conecte los conductores de prueba en los terminales mA en la columna de la izquierda. [51]

2. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE. [51]

3. Pulse  para seleccionar corriente y pulse las teclas  y  para introducir el valor que desea para la corriente. [51]

4.1.1.9. Simulación de un Transmisor de 4 a 20 mA.

La simulación es un modo especial de funcionamiento en el cual el calibrador se conecta en un bucle en lugar de un transmisor para suministrar una corriente de prueba de valor conocido y ajustable. Para simular, proceda como sigue: [51]

1. Conecte la fuente de alimentación de bucle de 24 V tal como se muestra en la figura 59. [51]

2. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE. [51]

3. Pulse  hasta que ambos mA y SIM aparezcan en la pantalla. [51]

4. Pulse las teclas  y  para introducir el valor que desea para la corriente. [51]

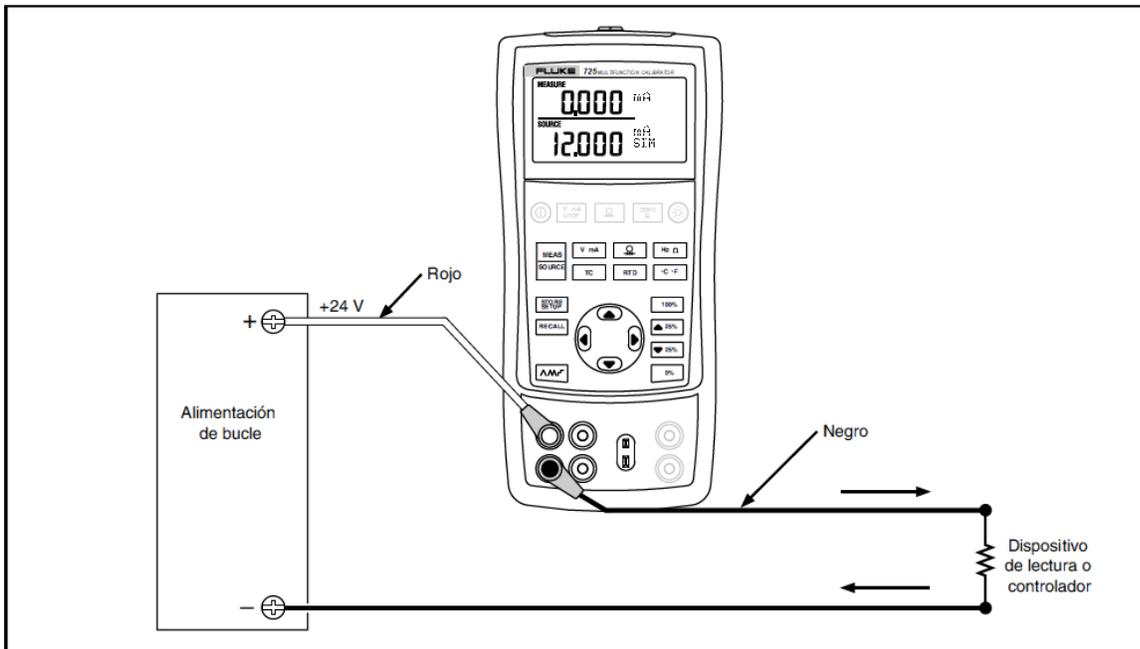


Figura 64. Conexión para simular transmisor de señal 4 a 20 mA. [51]

4.1.1.10. Fuente de Otros Parámetros Eléctricos.

El calibrador también puede servir de fuente de voltios, ohmios y frecuencia presentándolos en la parte inferior de la pantalla. Para seleccionar una función de fuente de un parámetro eléctrico, proceda como sigue: [51]

1. Conecte los conductores de prueba como se muestra en la figura 60, dependiendo de la función de fuente [51].
2. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE [51].
3. Pulse  para tensión corriente continua, o  para frecuencia o resistencia [51].
4. Pulse las teclas  y  para introducir el valor de salida que desea. Pulse  y  para seleccionar un dígito diferente a cambiar [51].

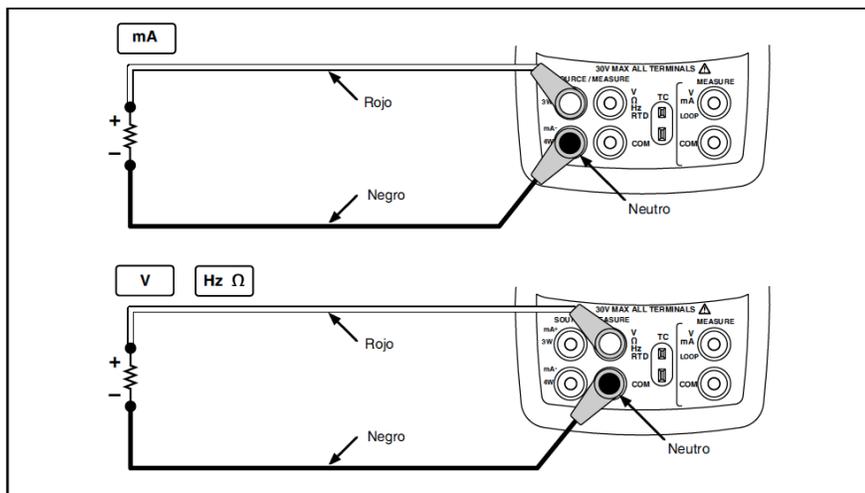


Figura 65. Conexión como fuente de parámetros eléctricos. [51]

4.1.1.11. Fuente de Presión.

El calibrador funciona como fuente de presión al medir la presión suministrada por una bomba u otro medio y presentar la presión en el campo SOURCE. [51]

La figura 61 muestra cómo conectar una bomba a un módulo de presión de Fluke que funciona como fuente calibrada. Conecte el módulo de presión adecuado para la presión de proceso a probar. Proceda como sigue para funcionar como fuente de presión [51]:

1. Conecte el módulo de presión al calibrador tal como se muestra en la figura 61. Las roscas en los módulos de presión aceptan accesorios para tubería estándar ¼ NPT. Si es necesario, utilice el adaptador de ¼ NPT a ¼ ISO suministrado. [51]
2. Pulse la tecla  en la parte inferior de la pantalla. El calibrador detecta automáticamente cuál módulo de presión está conectado y fija automáticamente el rango correspondiente. [51]
3. El procedimiento de poner a cero un módulo depende del tipo de éste. O puede ir a la sección 4.1.1.6. en este capítulo del documento [51]
4. Suministre presión a la línea con la fuente de presión hasta el nivel deseado de acuerdo con el valor presentado en la pantalla. Si lo desea, continúe

pulsando  para cambiar las unidades de presentación de la presión a psi, mmHg, inHg, cmH₂O@4 °C, cmH₂O@20 °C, inH₂O@4 °C, inH₂O@20 °C, mbar, bar, kg/cm², o kPa. [51]

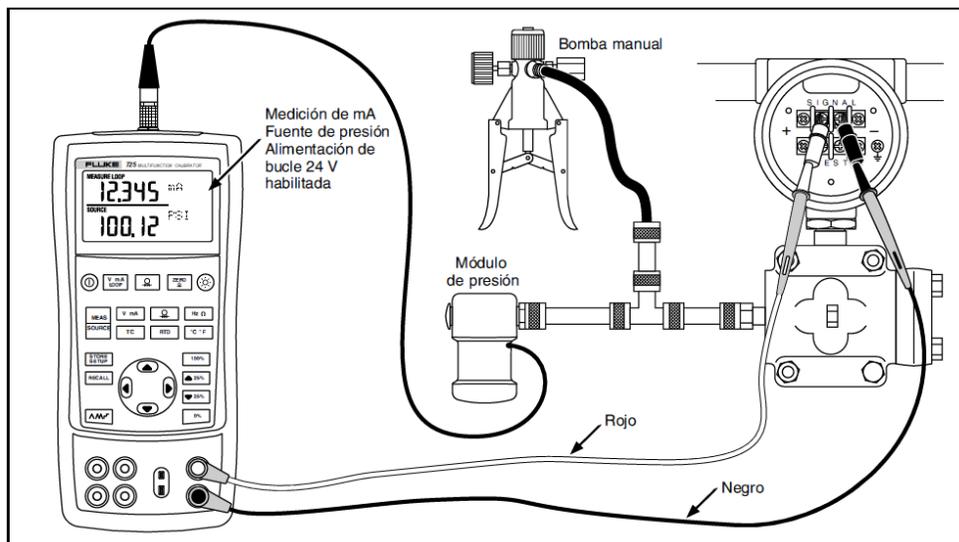


Figura 66. Conexión de bomba como fuente calibradora. [51]

4.1.1.12. Calibración de un Transmisor de Presión.

El ejemplo siguiente muestra cómo calibrar un transmisor de presión. Conecte el calibrador al instrumento a prueba tal como se muestra en la figura 61. Para calibrar un transmisor de presión, proceda como sigue: [51]

1. Pulse  para seleccionar corriente en la parte superior de la pantalla. Si es necesario, pulse  nuevamente para activar alimentación de bucle. [51]
2. Pulse  en la parte inferior de la pantalla. [51]
3. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE. [51]
4. Ponga a cero la lectura del módulo de presión. [51]
5. Realice las comprobaciones a 0 % y 100 % de la amplitud y ajuste el transmisor según sea necesario. [51]

4.1.1.13. Calibración de un Dispositivo I/P.

La siguiente prueba le permite calibrar un dispositivo que controla presión. Para hacerlo, proceda como sigue:

1. Conecte los conductores de prueba al instrumento a probar tal como se muestra en la figura 62. Las conexiones simulan un transmisor corriente a presión y miden la salida de presión correspondiente. [51]
2. Pulse  en la parte superior de la pantalla. [51]
3. Pulse  para seleccionar fuente de corriente en la parte inferior de la pantalla. [51]
4. Si es necesario, pulse  para activar el modo SOURCE. [51]
5. Pulse las teclas  y  para introducir el valor que desea para la corriente. Pulse  y  para seleccionar dígitos diferentes. [51]

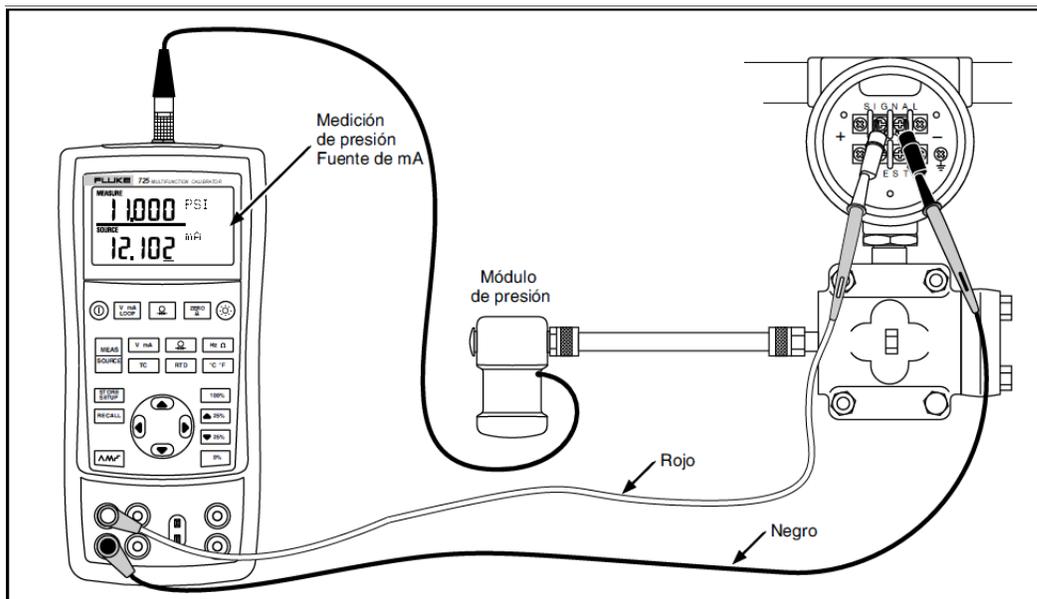


Figura 67. Conexión para calibración de transmisor corriente a presión. [51]

4.2. MÓDULO DE PRESIÓN Fluke SERIE 700.

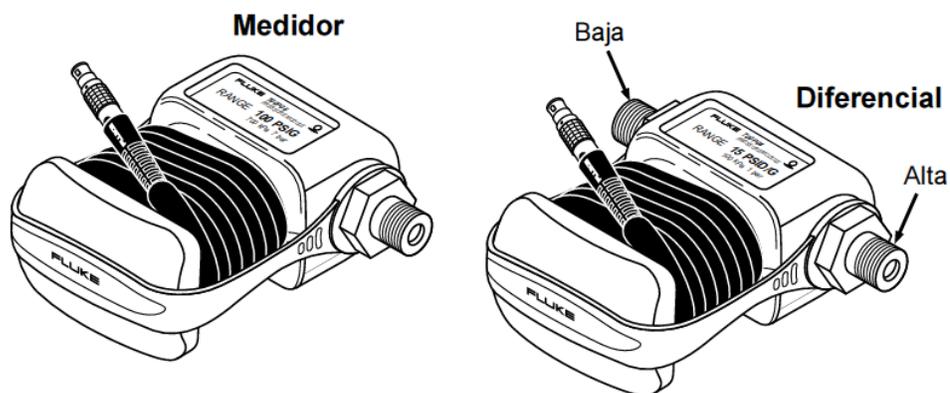


Figura 68. Módulos de presión Fluke serie 700. [46]

Los módulos de presión serie 700 de Fluke permiten medir presión con un calibrador de proceso serie 700 de el mismo fabricante. En esta aplicación se trabajó con el módulo 700 P 06 y el calibrador de proceso 726, el cual se presentó ya en la sección anterior; estos dos equipos se complementan permitiendo obtener medidas de mucha fidelidad al aprovechar mutuamente sus características de resolución y precisión. [46]

El modulo recibe la alimentación necesaria para su funcionamiento del calibrador de proceso y mide la presión utilizando el efecto piezoeléctrico en donde se genera una señal que va a un microprocesador, quien la traduce y la transmite al calibrador de procesos, en donde se visualiza la presión en unidades que pueden ser modificada según la aplicación o necesidad. [46]

Los módulos de presión tipo medidor tienen un solo conector y proporcionan una medida de presión respecto a la presión atmosférica. Los módulos tipo diferencial cuentan con dos conectores y miden la diferencia entre la presión aplicada en el conector de presión alta respecto a la del conector de presión baja. La figura 1 ilustra estos dos tipos de módulos. Un módulo de presión tipo diferencial funciona como uno tipo medidor cuando el conector inferior está abierto. [46][52]

- Especificaciones módulo de presión Fluke 700P06:

MODELO	RANGO ²	MEDIDOR O DIFERENCIAL	AISLADO O SIN AISLAMIENTO	REFERENCIA DE INCERTIDUMBRE (23 ° ± 3 °C)	ESTABILIDAD (1 AÑO)	TEMP (0 ° a 50 °C)	INCERTIDUMBRE TOTAL ³ (% de escala completa) 1 AÑO
FLUKE-700P06	0 a 100,00 psi 0 a 700,00 kPa 0 a 7,0000 bar	Medidor	Aislado	0,025 %	0,010 %	0,015 %	0,050 %

Tabla 7. Especificaciones funcionamiento módulo 700P06 [46]

4.3. GUÍA DE LABORATORIO DEL MÓDULO DE PRESIÓN.

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

A continuación se presenta una guía de laboratorio con el procedimiento para conectar un transmisor indicador de presión a un lazo 4 a 20mA, manipular algunas de sus propiedades al momento de realizar medidas y leer información en este a través del protocolo HART. También permite realizar la calibración de una serie de manómetros y el transmisor indicador, en donde se utiliza como patrón un calibrador de proceso por sus cualidades de diseño y fabricación que garantizan la calidad de las medidas.



Figura 69. Estudiantes de postgrado trabajando con el módulo de presión, Especialización en control e instrumentación industrial, laboratorio.

La guía que se presenta acá ya ha sido ejecutada en el laboratorio de instrumentación electrónica por estudiantes de especialización, arrojando los mejores resultados; en donde los estudiantes no presentaron dificultad con su desarrollo y abordaron temas de mucha importancia para el área laboral. Brindándoles la experiencia de manejar la variable presión, manipular un transmisor de presión mediante un lazo de corriente 4 a 20 mA + protocolo HART y realizar calibración de los instrumentos de medidas.

4.3.1. Objetivos.

- a. Conocer la estructura interna y principio de operación de un medidor mecánico de presión relativa (manómetro) y de un transmisor indicador de presión relativa con lazo 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.

4.3.2. Procedimiento.

- a. Identificar la *bomba manual Fluke*, la cual constituye el suministro de presión de aire (0psi a 100psi) y posee una válvula reguladora de presión de entrada.



Figura 70. Bomba de presión Fluke serie 700 LTP.

- b. Identificar el módulo de presión, el transmisor indicador de presión Smar 4 a 20mA + HART, manómetros, instalaciones eléctricas y accesorios y facilidades de montaje.

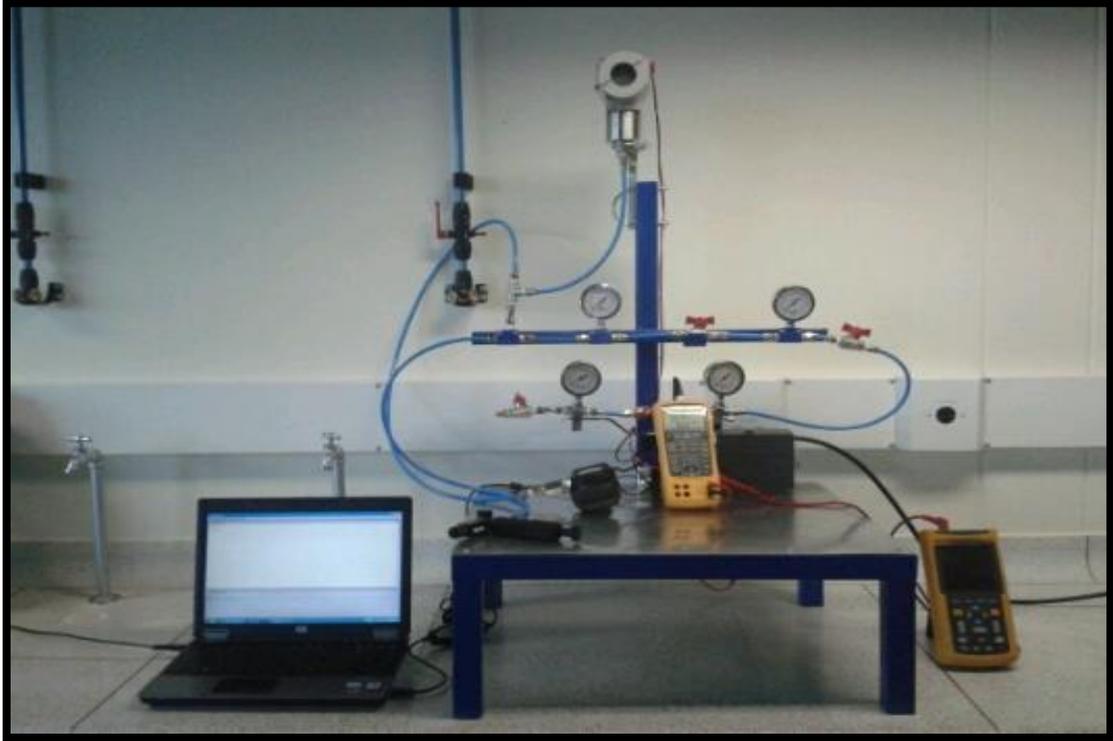


Figura 71. Circuito básico de presión.

- c. Reconocer el calibrador de procesos Fluke 726 con su módulo de presión manométrica (0psi a 100psi).
- d. Verificar el montaje del lazo de presión según el esquema de conexiones que se muestra en la siguiente figura.
- e. Verificar la conexión eléctrica del transmisor Smar como se muestra en la figura.

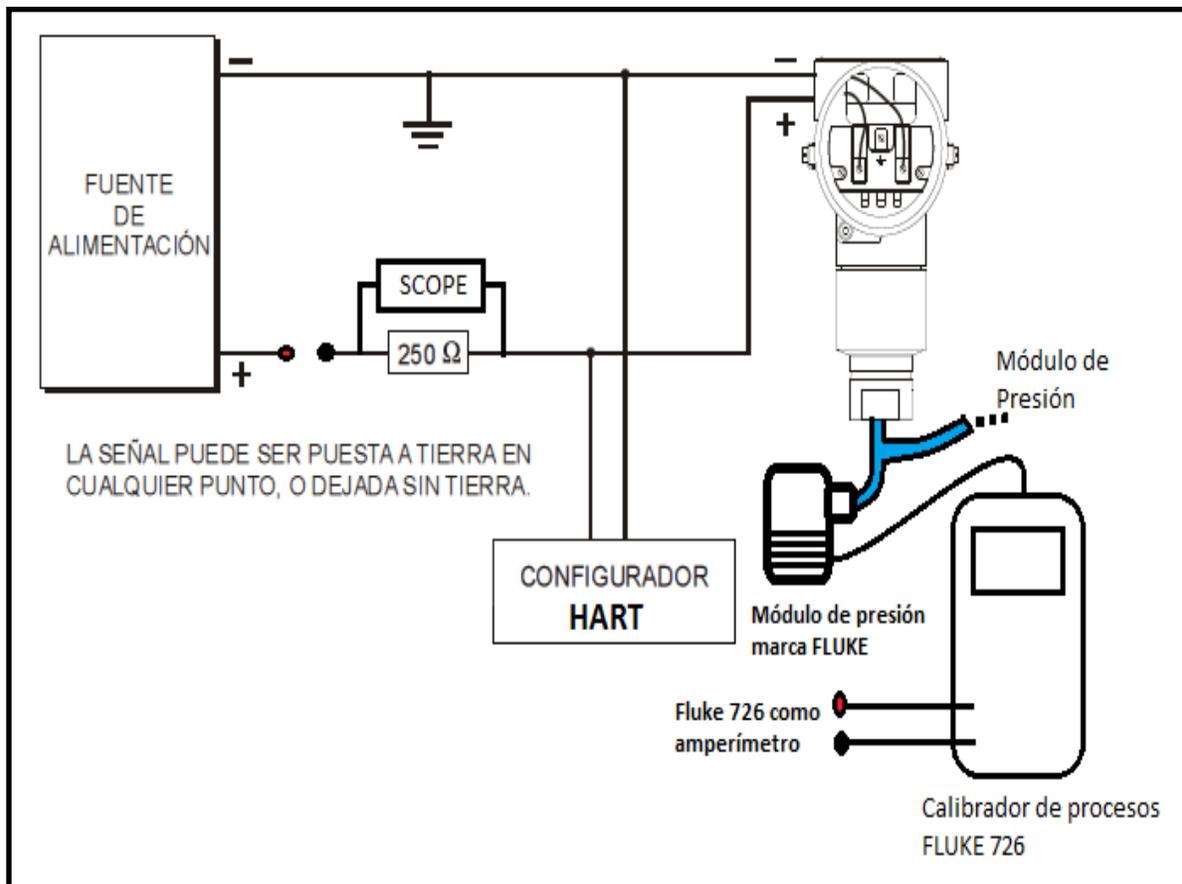


Figura 72. Conexión eléctrica para implementar lazo 4 a 20 mA + protocolo HART.

- f. Verificar en el calibrador de procesos que las entradas de presión y corriente estén en modo MEASURE.
- g. Realizar un preload en todos los medidores de presión utilizando la bomba manual para ajustar la presión hasta 80 psi. El preload garantiza el correcto funcionamiento de los medidores y la dinámica interna de los dispositivos de medición (Ver figura). Tener cuidado de aislar con la respectiva válvula cada manómetro conforme vayan llegando a su *full scale*. Verificar pruebas de estanqueidad (fugas).

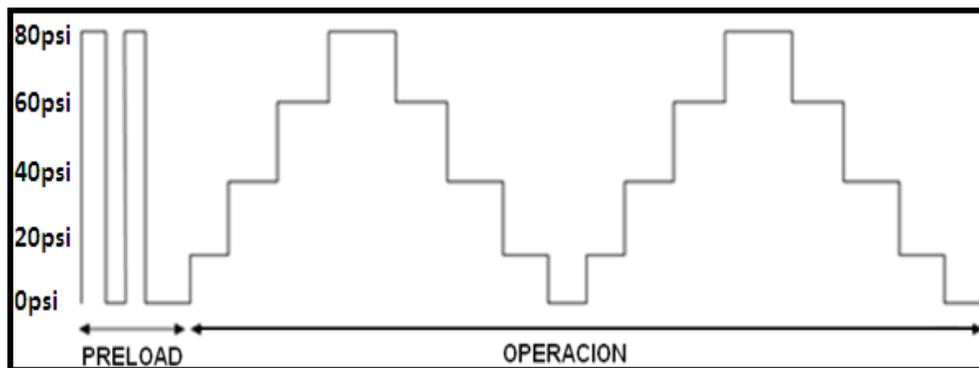


Figura 73. Escala de preload

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

Manómetros: 0psi.

Transmisor Smar: 0psi.

Calibrador de procesos: 4mA – 0psi.

- h. En caso de no estar en cero, dar unos leves golpes en el cristal de los manómetros (*Ajuste de cero por eliminación de histéresis*).
- i. Abrir el programa DDCON 100. Este programa tendrá las funciones necesarias para la implementación, configuración y uso del transmisor Smar LD291 mediante el lazo de 4 a 20 mA, a través de una configuración vía protocolo HART.
- j. Verificar en el menú Settings en la opción Communication Port... que aparezca habilitado DDCON 100-0, esto significa que el programa reconoció la interfaz USB y puede hacerse uso de dicha herramienta. Mirar la figura 72.
- k. 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.

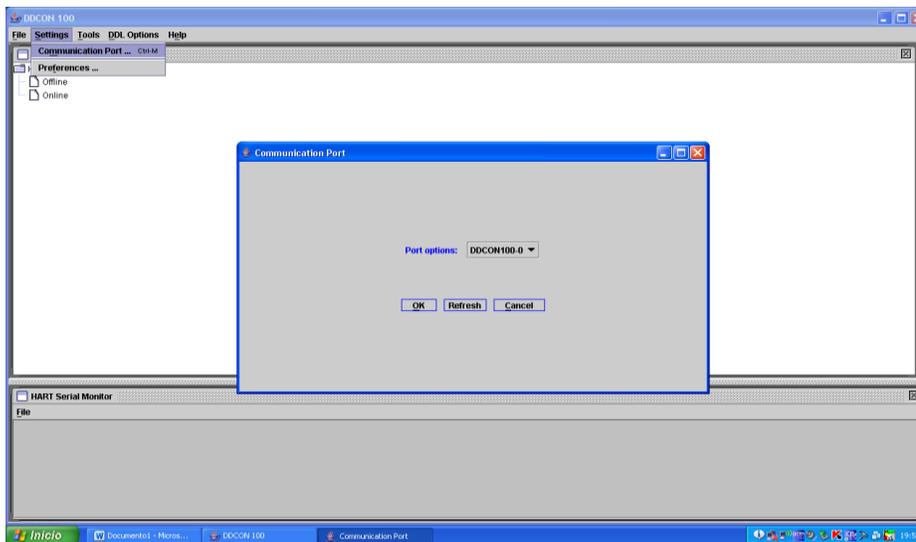


Figura 74. Verificar conexión.

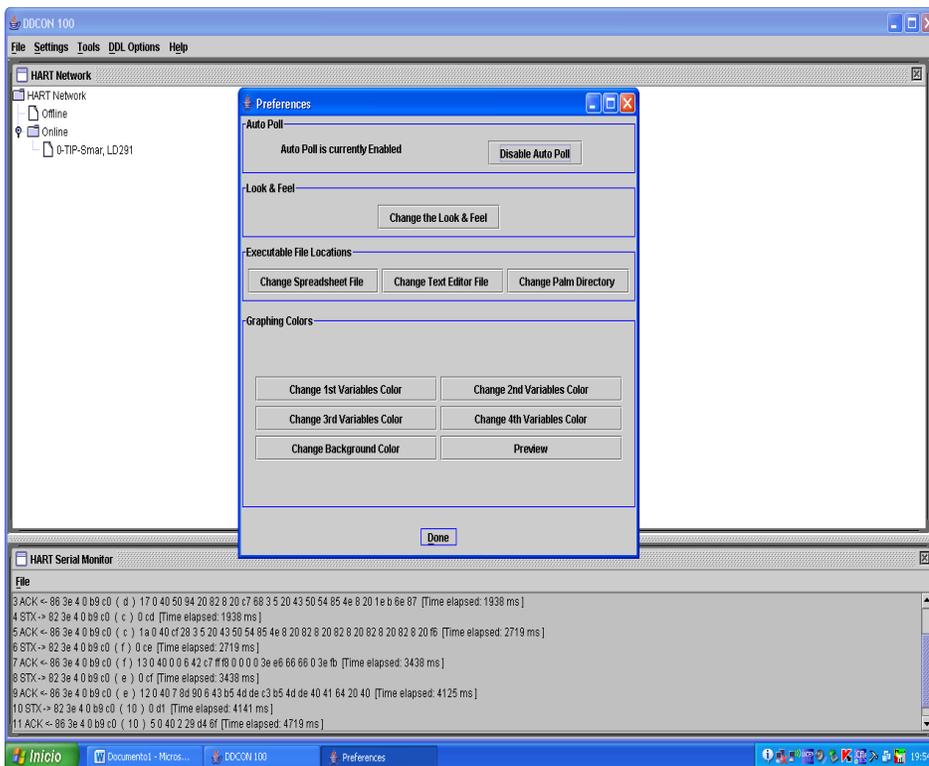


Figura 75. Verificar auto poll

- I. 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 siguiente ventana.

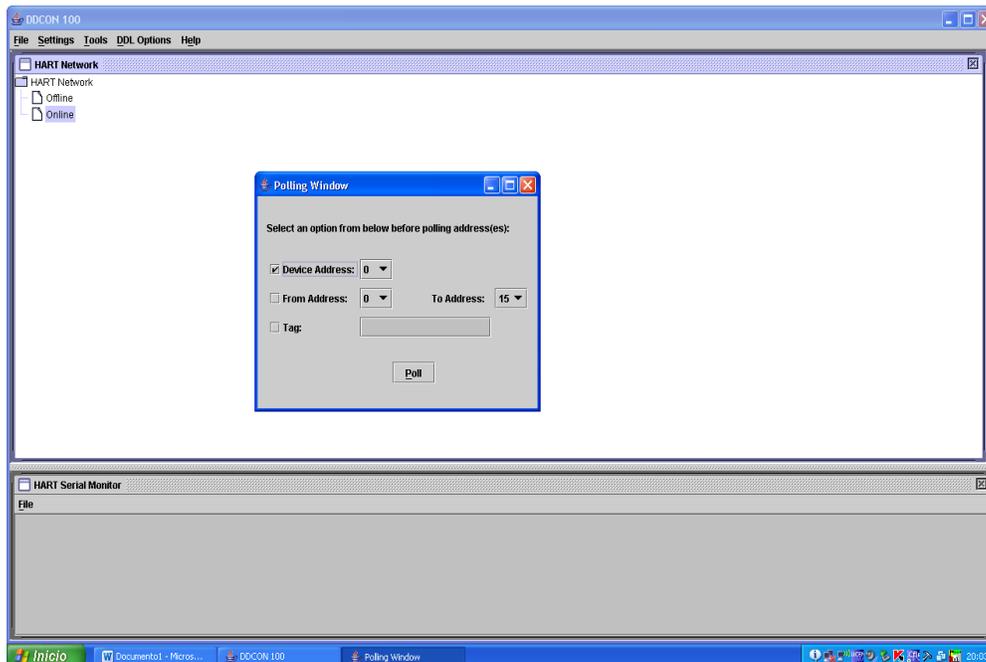


Figura 76. Opciones para búsqueda de equipos.

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

- *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).
- m. 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 en tiempo real que arroja el transmisor

de presión Smar. Explore los diferentes menús y opciones que despliega la ventana, sin modificar los parámetros establecidos.

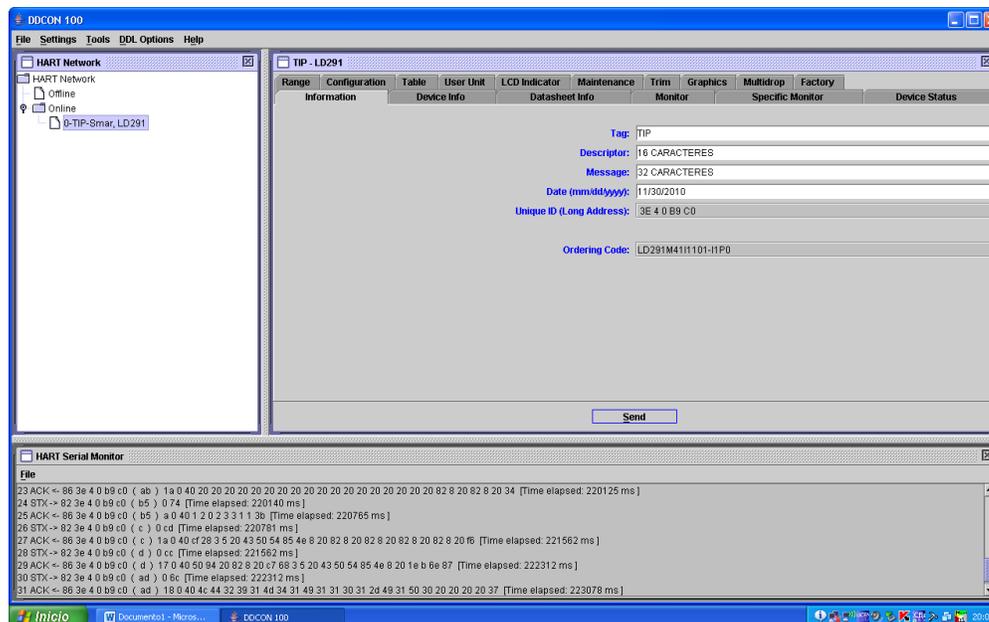


Figura 77. Menú de ajuste.

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.

- n. Se construirán dos (2) curvas de ascenso-descenso del transmisor indicador de presión y de los manómetros, registrando la *Presión (Manómetros y PIT) Vs Corriente (calibrador de procesos) Vs Presión patrón (calibrador de procesos)* para el rango de 0psi a 80psi, cada 5psi (Ver Tabla 6).

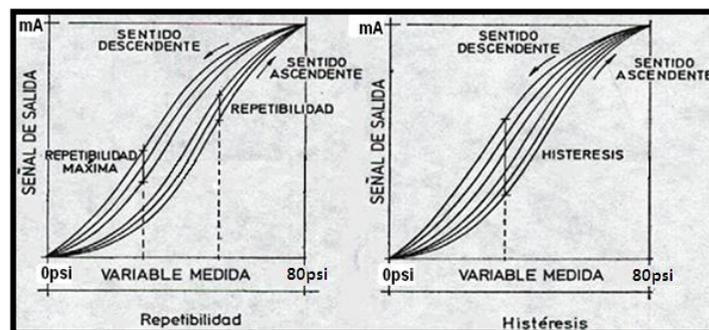


Figura 78. Graficas de repetibilidad e histéresis.

Tabla 7. Datos de Ascenso-Descenso de la Presión.

		Curva Ascenso – Descenso 1							Curva Ascenso – Descenso 2				
Calibrador de Procesos		Presión (psi)					Calibrador de Procesos		Presión (psi)				
Presión (psi)	Corriente (mA)	PIT		PG 30	PG 60	PG 100	Presión (psi)	Corriente (mA)	PIT	PG 15	PG 30	PG 60	PG 100
0							0						
5							5						
10							10						
15							15						
20							20						
25							25						
30							30						
35							35						
40							40						
45							45						
50							50						
55							55						
60							60						
65							65						
70							70						
75							75						
80							80						
75							75						
70							70						
65							65						
60							60						
55							55						
50							50						
45							45						
40							40						
35							35						
30							30						
25							25						
20							20						
15							15						
10							10						
5							5						
0							0						

- o. Abrir las válvulas consecutivamente liberando las presiones desde el manómetro de 15psi hasta llegar al de 100psi. Esto hará que la presión del lazo sea cero.
- p. Desenergizar el modulo luego de haber obtenido los datos necesarios.

4.3.3. Resultados.

- a. En una misma gráfica **Presión (Calibrador de procesos) Vs Corriente (Calibrador de procesos)**, 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 (Calibrador de procesos)**, 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).

4.3.4. Conclusiones y recomendaciones sobre la práctica.

RECOMENDACIONES

A la hora de utilizar el módulo o cualquiera de los instrumentos en él, se recomienda hacerlo tomando como referencia la guía de laboratorio, que permite realizar medidas de presión relativa y manipulación adecuada de los instrumentos presentes en este. Si se desea obtener más información, puede remitirse a la planteada en el contenido de este documento, quien brinda información seleccionada y enfocada a la variable presión, o en su defecto a los manuales de los equipos que se encuentran en el taller del laboratorio o algunos en la web.

Al implementar un circuito de presión nuevo en el módulo, realice prueba de estanqueidad que permita verificar que el sistema no tiene fuga y así garantizar la calidad de las medidas tomadas.

A la hora de tener el modulo presurizado, para prevenir fugas de presión violentas, manipule las válvulas aisladoras y descargue el sistema antes de desconectar o conectar cualquier instrumento a la línea de presión.

Como en el módulo se cuenta con instrumentos de diferentes escalas, se debe ser muy cuidadoso de no aplicar presiones superiores a la escala máxima manejada, lo recomendable es llevarlos al 80% de la escala máxima de medida, garantizando con esto una medida con buena fidelidad y prolongando con esto la vida útil del instrumento.

Si se desea servicio técnico de algún instrumento o alguna asesoría, diríjase al almacén del laboratorio en donde le brindaran la orientación necesaria y encontrara personal capacitado para realizar los procedimientos adecuados entorno a su dificultad.

Recomendaciones en la utilización del protocolo HART:

Tener en cuenta la distancia máxima permitida (3000 metros para par trenzado y 1000 metros para par trenzado múltiple), así como los tipos de cable y la calidad de las conexiones, ya que las caídas de tensión pueden afectar las variaciones en frecuencia.

Tener en cuenta que una de las limitantes del protocolo HART es su velocidad la cual permite de 2 a 3 actualizaciones por segundo. No es recomendable para procesos en los que la variable cambie abruptamente.

La opción multipunto es recomendable utilizarla solo para monitoreo de variables. Se debe evitar el uso de herramientas internas de los transmisores tales como el control PID interno, para los instrumentos que lo posean.

Asegurarse de que el montaje de la topología de conexión coincida con el que aparece en el manual de los dispositivos.

Realizar pruebas de lazo para verificar una correcta conexión de los dispositivos.

Ajustar valores de estado y diagnóstico tales como, alarmas por alto y bajo.

Verificar que información como el Tag, rango de operación, la descripción, unidades, mensajes, valores de amortiguamiento y fechas de calibración entre otros estén correctamente.

Comprobar que las señales tanto la del lazo 4 a 20 mA como la de comunicación HART se estén enviando de manera correcta antes de lanzar la puesta en servicio de un proceso.

CONCLUSIONES

Se realizó el diseño de un módulo con una estructura didáctica para la medición de la variable presión, que brinda no solo la libertad de plantear diferentes temas y procedimientos entorno a esta variable, sino que tiene la posibilidad de que se le realicen modificaciones en pro de mejoras, utilizando nuevas herramientas sin dejar de aprovechar los instrumentos que ya se tienen.

Se generó una guía de laboratorio para el circuito básico de presión trabajado en el proyecto, la cual ya ha sido puesta a prueba junto al modulo, con estudiantes de la especialización en Control e Instrumentación Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, obteniendo resultados satisfactorios, en donde los estudiantes se mostraron muy cómodos, afrontando situaciones entorno a la variable presión que son de mucha importancia para su formación. En esta guía de laboratorio se especificaron los procedimientos que se deben realizar para garantizar el éxito en los ensayos y las mediciones. La guía de laboratorio está diseñada basada en los parámetros especificados en las normas y guías técnicas mencionadas en este documento, con el fin de asegurar confiabilidad en las medidas y que los procedimientos creen destrezas entre los estudiantes.

Se hizo un estudio para seleccionar el sistema de adquisición de datos, en donde se seleccionaron algunos equipos de la marca National Instrument, que cumplen con los requerimientos y necesidades del proyecto, además brindan la libertad de ampliar sus capacidades teniendo en cuenta trabajos futuros entorno a la recolección de datos en el modulo de presión. Para la seleccion del equipo se tuvo presente que la universidad cuenta con algunas licencias para software de esta marca, lo cual facilita el trabajo.

La utilización de herramientas tipo CAD, como SolidWorks, juegan un papel importante en la etapa de diseño de cualquier infraestructura de procesos. Este tipo de herramientas ayuda a realizar una visualización y tener una idea más clara, antes de la ejecución del proyecto, lo que minimiza errores y garantiza el éxito desde el punto de vista funcional y estético.

La presión es una de las variables mas medidas en los procesos industriales por su capacidad de inferir otras variables, a partir de presiones relativas o

diferenciales, es por esto que se desarrollo el fundamento teórico, caracterizando de esta manera la variable de procesos, con el fin de tener conocimientos sobre los factores y condiciones que puedan intervenir o afectar en los procedimientos de mediciones. El conocimiento que se tenga de la variable de procesos es de vital importancia, ya que esto se puede traducir en la toma rápida de decisiones, reconocimiento de anomalías o la ejecución de maniobras de seguridad en un ambiente industrial o con algún tipo de riesgo para el personal involucrado.

Las condiciones ambientales de los laboratorios donde se realicen ensayos y calibraciones están bien definidas por la norma ISO 17025, la cual describe como deben ser las características ambientales de un laboratorio para lograr el éxito en los procedimientos. En el laboratorio de Instrumentación Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana se tiene en cuenta esta norma para la realización de procedimientos de ensayo, a manera de guía para lograr los fines académicos de los distintos módulos presentes en el laboratorio. Si bien es complejo cumplir a cabalidad con la norma por cuestiones de presupuesto y logística, los procedimientos seguidos en la elaboración del diseño cumplen con el objetivo académico del laboratorio de instrumentación.

En la implementación del circuito básico se utilizaron instrumentos de medición confiables tales como el transmisor indicador de presión SMAR LD 291 y el modulo de presión FLUKE 700p06 el cual es el instrumento patrón en los procedimientos de comparación, por sus características de fabricación y la garantía que brinda el proveedor con su certificado de calibración; se puede afirmar que este dispositivo es trazable con laboratorios certificados como los de Fluke ó Smar. El trabajo con medidores de este tipo es esencial en los procedimientos de ensayo y comparación con instrumentos de menor resolución, permitiendo considerar cuales necesitan de un remplazo o ajuste si el dispositivo lo permite.

Utilizando las ventajas que ofrece el transmisor SMAR LD 291, se implemento un lazo de 4 a 20mA con protocolo por HART para lograr la comunicación y el monitoreo de la variable de manera remota, esto con el objeto de familiarizar a los estudiantes y personal que realice practicas y ensayos, con el protocolo de comunicación industrial más utilizado en los procesos alrededor del mundo. El hecho de tomar una tecnología antigua como el lazo de 4 a 20mA y utilizarla para transmitir información digital, es lo que hizo popular a este protocolo de comunicación, garantizando robustez y compatibilidad con una infraestructura

ya existente. El conocimiento acerca del protocolo HART y otro tipo de protocolos de comunicación es algo que se debe tener en cuenta en la formación de los estudiantes de ingeniería electrónica, mecánica, industrial y carreras afines.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANTONIO CREUS, Instrumentación industrial, 8ª Edición, Editorial Alfa & omega, 2011, p.91-104.
- [2] MODOS DE PRESION [En línea] < <http://www.me.uprm.edu/fpla/intro.html> > [Citado 11 de Junio de 2013]
- [3] ERNESTO E. GALLONI, RODOLFO H. BUSCH, Nociones Elementales de Física y Química, Librería y Editorial ALSI, p.89.
- [4] EXPERIMENTO DE TORRICELLI [En línea] <http://www.ambientum.com/enciclopedia/atmosfera/3.01.16.06_1r.html> [Citado 06 de Junio de 2013]
- [5] MANOMETRO DE TUBO EN U [En línea] <<http://www.sabelotodo.org/aparatos/manometros.html> > [Citado 09 de Junio de 2013]
- [6] LUIS CARLOS ÁLVAREZ VÉLEZ, Metrología Biomédica, Editorial Artes y Letras Ltda, 2008, p.145.
- [7] MANOMETRO DE TUBO INCLINADO [En línea] <<http://www.tecnoficio.com/docs/doc57.php>> [Citado 10 de Junio de 2013]
- [8] TUBO EN U Y TUBO BOURDON [En línea] <<http://autoentusiastas.blogspot.com/2010/11/vacuometro-esse-desconhecido.html>> [Citado 30 de Agosto de 2012]
- [9] GILBERTO ENRIQUEZ HARPER, El abc de la instrumentación en el control de procesos Industriales, Editorial Limusa, 2012, p.150.
- [10] ESPIRAL [En línea] <<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d7.htm>> [Citado 13 de mayo de 2013]

[11] ELEMENTO EN ESPIRAL Y HELICOIDAL [En línea]
<<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>> [Citado 13 de mayo de 2013]

[12] MERLE C. POTTER, DAVID C. WIGGERT, Mecánica de fluidos, 3ª Edición, Editorial Thomson, 2002, p.583-584.

[13] SERIE: MUNDO ELECTRONICO, Introducción a la bioingeniería, Editorial Marcombo, 1988, Capitulo 4.3

[14] STANLEY WOLF, Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio, Editorial Pearson, p.415.

[15] FRANCISCO SANCHEZ, ANTONIO PEREZ, JOAQUIN SANCHO, PABLO RODRÍGUEZ, Mantenimiento mecánico de máquinas, 2ª Edición, Editorial de Universitat Jaume, 2007, p.371.

[16] ANTONIO CREUS, Instrumentos industriales, 3ª Edición, Editorial Alfa & omega, 2009, p.55-62.

[17] PROTOCOLO HART [en línea]
http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_HART [2013-08-16]

[18] ACERCA DEL PROTOCOLO HART [en línea]
<http://sp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol.html> [2013-08-16]

[19] COMO FUNCIONA HART [en línea]
http://sp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_how.html [2013-08-16]

[20] ¿QUE ES HART? [en línea]
http://sp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_what.html [2013-08-16]

[21] BENEFICIOS DE USAR LA COMUNICACION HART [en línea]
http://sp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_benefits.html [2013-08-16]

[22] ESTUDIO SOBRE INTEGRACIÓN DE REDES DE INSTRUMENTACIÓN DIGITALES EN SISTEMAS DE CONTROL PARA EL MEJORAMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES [en línea]

<http://repository.ean.edu.co/bitstream/10882/328/7/RianoDiana2010.pdf.txt>
[2013-08-18]

[23] LOS BENEFICIOS DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN HART® EN SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN INTELIGENTES [en línea]
<http://www.smar.com/espanol/hart.asp> [2013-08-18]

[24] VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA - CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y GENERALES, Y TERMINOS ASOCIADOS (VIM). [en línea]
<http://www.inm.gov.co/ckfinder/userfiles/files/vocabulario.pdf> [2013-07-25]

[25] ROCÍO M. MARBÁN, JUIO A. PELLECCER C., metrología para no metrólogos, 2ª Edición, Editorial Producción y Servicios Incorporados S.A., 2002 p. 20.

[26] HERRERA SÁNCHEZ ANDRÉS FERNANDO, QUINTERO HERRERA TITO JOSÉ, Diseño de un banco para la medición de temperatura en el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. 2013

[27] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para calibración de de patrones de medida. Guía Técnica Colombiana GTC 60. Bogotá: ICONTEC, 1998. p.38 : il. (GTC 60)

[28] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Manómetros tipo Bordón, dimensiones, requisitos y ensayos. Norma Técnica Colombiana NTC 1420. Bogotá: ICONTEC, 2001 : il. (NTC 1420)

[29] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Metrología. Manómetros indicadores de presión. Manómetros de vacío y manómetros de presión y vacío para usos generales. Norma Técnica Colombiana NTC 2263 Bogotá: ICONTEC, 2001 : il. (NTC 2263)

[30] MANOMETRO DE PISTON MARCA FLUKE. [en línea]

http://la.flukecal.com/products/pressure-calibration/piston-gauges/pg7000-series-piston-gauges/man%C3%B3metro-de-pist%C3%B3n-de-gas-d?quicktabs_product_details=3#quicktabs-product_details [2013-07-25]

[31] DR. J. J. LUETICH, Unidades de presión, 10 de enero de 2003. [en línea] <http://www.luventicus.org/articulos/03A001/index.html> [2013-07-25]

[32] LIBRAS POR PUGADA CUADRADA, KSI, MAGNITUD, CONVERSION. [en línea] http://centrodeartigos.com/articulos-de-todos-los-temas/article_31376.html [2013-07-25]

[33] ANA BEATRIZ PICADO, química I, 2ª EDICION editorial universidad estatal a distancia [en línea] <http://books.google.com.co/books?id=mjvKG4BJ0xwC&pg=PA22&dq=unidades+presion&hl=es&sa=X&ei=9CkRUuSPM-TYyQG78IAw&ved=0CEIQ6AEwAw#v=onepage&q=unidades%20presion&f=false> [2013-07-25]

[34] Unidades de Presión [en línea] <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica/contenido/material-de-clase/Tema-7/unidades-presion.pdf> [2013-07-25]

[35] J.L. GALÁN GARCIA, Sistema de Unidades Físicas, 2ª Edición, editorial everté s.a. 1987 [en línea] <http://books.google.com.co/books?id=iJMTyEe0vBcC&pg=PA40&dq=unidad+baria&hl=es&sa=X&ei=G0obUuz5AYH49gTyIYCQAg&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q=unidad%20baria&f=false> [2013-07-29]

[36] VARIANTES DE LA INSTRUETACION ELECTRONICA [en línea] <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2010/05/14/variantes-de-la-instrumentacion-electronica/> [2013-08-10]

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

[38] SMAR - LD301, TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESION CON CONTROL PID INCORPORADO, manual de instrucciones, operación y mantenimiento, Versión 6, 2010.

- [39]** TRANSMISOR SMAR LD291 [en línea]
<http://www.chevrierinstruments.com/Anglais/Index-droit-nouv-jan-2002.asp>
[2013-08-10]
- [40]** SWAGELOK, MANOMETROS INDUSTRIALES Y PARA PROCESOS, serie PGI, manual de instrumentos.
- [41]** SWAGELOK, MANGERAS Y TUBOS FLEXIBLES, material PFA, manual de instrumentos.
- [42]** SWAGELOK, VALVULA DE AGUJA CON BONETE INTEGRAL, serie O, 1 y 18, manual de instrumentos.
- [43]** SWAGELOK, REGULADORES DE PRESION, serie KPR de servicio general, manual de instrumentos.
- [44]** NORGREN, FILTRO REGULADOR [en línea]
<http://www.logismarket.com.mx/norgren/filtro-reguladores-para-aire-comprimido/1321744039-1313791272-p.html> [2013-08-10]
- [45]** BOMBA NEUMATICA DE PRUEBA 700PTPK [en línea]
<http://www.fluke.com/fluke/usen/accessories/pressure/700ptp-1.htm?PID=55152> [2013-08-10]
- [46]** FLUKE, MODULOS DE PRESION SERIE 700, manual de instrucciones, 1994
- [47]** MODEM CONFIGURADOR HART DDCON 100 [en línea]
<http://gamaautomation.com/gallery.html> [2013-08-10]
- [48]** NATIONAL INSTRUMENT, MODULO DE ADQUISICION DE DATOS NI 9203 [en línea]
http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/crio9203_1.jpg&title=NI%209203&oracleLang=esa [2013-08-13]
- [49]** NATIONAL INSTRUMENT, NI cDAQ-9174, Chasis NI CompactDAQ USB 4 Ranuras MODULO [en línea]
http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=207535&mTitle=NI%20cDAQ-9174&mGallery=set_cdaq-9174 [2013-08-13]

[50] DELL, Inspiron One 2330 with Energy Star 5.2 [en línea]
<http://www.dell.com/ca/p/inspiron-one-23-2330-aio/pd> [2013-08-13]

[51] FLUKE, CALIBRADOS DE PROCESO MUTIFINCIÓN 726,
descripción general del producto, 2005.

[52] SENSORES DE PRESION. [en línea]
<http://www.casio-intl.com/latin/es/wat/protrek/tech2/> [2013-08-26]

[53] MANÓMETRO DE TUBO INCLINADO [en línea]
http://www.absoger-atmosfera-controlada-generator-nitrogeno.com/fruit/fruit_es_accessoires.php?lang=3 [2013-09-01]

[54] GUILLERMO HASSAN JARABA GULFO, GERARDO IVAN SALAZAR VASQUEZ, implementación de un módulo didáctico para medir presión relativa, basado en un manómetro tipo Bourdon con indicación analógica y digital y transmisión 4-20mA. 2013.

[55] TUBO BOURDON EN ESPIRAL [En línea],
http://www.eq.uc.pt/~lferreira/BIBL_SEM/global/bourdon/3.htm [2013-09-01]

[56] CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS & CENTRO PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO INDUSTRIAL, Introducción a los Sensores [en línea]
<http://books.google.com.co/books?id=7gvKoGAZIJwC&pg=PT45&dq=tubo+bou+rdon+en+espiral&hl=es&sa=X&ei=8eAgUuuXLsy7sQSlrYHwBg&ved=0CFsQ6AEwBQ#v=onepage&q&f=false>, p.46 [2013-09-01]

[57] DIAFRAGMA [en línea],
<http://www.creativevacuum.co.uk/capsules+diaphragms-cap.html> [2013-09-01]

[58] GALGA EXTESIOMÉTRICA [en línea],
<http://www.drucksensor-knowhow.de/blog/2010/04/28/funktionsprinzip-resistiver-drucksensor/> [2013-09-03]

[59] RENDERIZACION [en línea],
<http://es.wikipedia.org/wiki/Renderizaci%C3%B3n> [2013-09-05]

[60] SOLIDWORKS [en línea],
<http://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> [2013-09-05]

[61] CALIBRADOR DE PROCESOS [en línea],
<http://es.scribd.com/doc/53207897/Calibrador-de-Procesos> [2013-09-05]

[62] ESTANQUEIDAD [en línea],
<http://lacomunidad.elpais.com/juntasindustriales/2008/5/22/estanqueidad-conceptos> [2013-09-05]