

ADECUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO CONTROL DE  
PRESIÓN PROCON 38-714 DE FEEDBACK

GLORIA ELIANA GUTIERREZ MARTÍNEZ

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

2018

ADECUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO CONTROL DE  
PRESIÓN PROCON 38-714 DE FEEDBACK

GLORIA ELIANA GUTIERREZ MARTÍNEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica

DIRECTOR DEL PROYECTO

Carlos Gerardo Hernández Capacho

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

2018

## DEDICATORIA

*Dedico este importante triunfo en mi vida a mi hogar y a mis hijos porque ellos cuatro son el motivo que cada día me obliga a seguir adelante en la búsqueda de nuevas y mejores metas que beneficien la calidad de vida de nuestro hogar bendecido con la mano derecha de mi Dios y La Virgen.*

## AGRADECIMIENTOS

La autora de esta tesis expresa sus agradecimientos a todas las personas que contribuyeron y aportaron al desarrollo de este trabajo de grado especialmente a:

A la sociedad Ganadería Manzanares S.A.S. de manera muy especial al doctor Francisco Arturo Serrano Serrano por su constante motivación para la culminación de este proceso académico

A los jefes laborales en la Ganadería Jorge Ernesto Serrano Troncoso y Andrés Francisco Serrano Troncoso por su disposición y manejo de las responsabilidades asignadas que garantizaron la feliz culminación de este gran logro que redunda en beneficio de todos en la empresa.

Al docente Juan Carlos Mantilla Saavedra quien facilitó información relevante para el planteamiento inicial desarrollo de la tesis y la utilización del módulo de presión para efectos del material de las prácticas de la materia Fundamentos de Automatización.

Al director de la tesis por su constante apoyo en esta labor docente.

Al grupo de trabajo del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Electrónica, especialmente a Doris Sánchez Uribe y Manuel Guillermo Quijano Ortega quienes siempre presentaron la mejor disposición y atención al servicio de los alumnos de la Facultad.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>13</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 PRESIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 UNIDADES DE LA VARIABLE PRESIÓN</b> .....	<b>15</b>
1.2.1 Pascal .....	15
1.2.2 Atmósfera.....	15
1.2.3 Torr .....	15
1.2.4 Baria.....	16
<b>1.3 TIPOS DE PRESIÓN</b> .....	<b>16</b>
1.3.1 Presión absoluta .....	16
1.3.2 Presión atmosférica .....	16
1.3.3 Presión relativa .....	16
1.3.4 Presión diferencial .....	16
1.3.5 Vacío.....	17
<b>1.4 ELEMENTOS DE MEDICIÓN</b> .....	<b>17</b>
1.4.1 Mecánicos.....	17
1.4.2 Elementos neumáticos.....	18
1.4.3 Elementos electromecánicos .....	18
<b>1.5 TRANSMISORES DE PRESIÓN</b> .....	<b>18</b>
1.5.1 Transmisores neumáticos .....	19
1.5.2 Transmisores electrónicos .....	19
1.5.3 Transmisor digital.....	21
<b>1.6 METROLOGÍA NORMAS Y ESTÁNDARES</b> .....	<b>26</b>

1.6.1	Metrología .....	26
1.6.2	Vocabulario metrológico.....	27
1.6.3	Normas .....	28
1.6.4	Normalización .....	32
1.6.5	Estandarización .....	34
1.6.6	Acreditación .....	34
1.6.7	Certificación .....	35
<b>1.7</b>	<b>MEDICIÓN DE CAUDAL BASADO EN PRESIÓN DIFERENCIAL .....</b>	<b>35</b>
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1</b>	<b>MÓDULO DE PRESIÓN.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR.....</b>	<b>40</b>
<b>2.2</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4</b>	<b>REDISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL Y DEL CIRCUITO IMPRESO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>56</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fuerzas aplicadas. ....	14
Figura 2. Diagrama de distribución de fuerzas. ....	15
Figura 3. Tipos de presión. ....	17
Figura 4. Trasmisor neumático .....	19
Figura 5. Transmisor electrónico.....	20
<i>Figura 6.</i> Señal electrónica 4 a 20mA cc 1 a 5Vdc .....	21
Figura 7. Comunicación punto a punto .....	23
Figura 8. Modulación ASK en HART, señal digital sobre la análoga de 4 a 20 mA .....	24
Figura 9. Manómetro de pistón .....	31
Figura 10. Teorema de Bernulli.....	36
Figura 11. Módulo de presión Procon 38-714.....	38
Figura 12. Sensor SDX15D4 de SenSym .....	39
Figura 13. Interfaz de Proceso y Controlador ABB Commander 300.....	39
Figura 14. Sensores de presión .....	40
Figura 15. Conexión de los sensores de presión .....	41
Figura 16. Caracterización del sensor directo.....	42
Figura 17. Caracterización del sensor diferencial .....	42
Figura 18. Circuito acondicionador de señal.....	43
Figura 19. Caja del transmisor .....	45
Figura 20. Carátula original del transmisor .....	45
Figura 21. Medidas laterales del circuito.....	46
Figura 22. Diseño del circuito impreso .....	47
Figura 23. Circuito impreso .....	47
Figura 24. Circuito impreso con sus componentes soldados.....	48
Figura 25. Circuito impreso por su cara de soldadura .....	48
Figura 26. Carátula de transmisor de prueba. ....	49
Figura 27. Circuito acondicionador de señal final .....	50
Figura 28. Diseño del circuito impreso definitivo.....	51
Figura 29. Circuito impreso final .....	51
Figura 30. Circuito impreso definitivo con componentes.....	52
Figura 31. Carátulas finales de los transmisores .....	52
Figura 32. Transmisores de presión finales .....	53
Figura 33. Montaje Final .....	53

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del sensor directo .....	42
Tabla 2 Caracterización del sensor diferencial .....	42



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ADECUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO CONTROL DE PRESIÓN PROCON 38-714 DE FEEDBACK

**AUTOR(ES):** Gloria Eliana Gutierrez Martínez

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

**DIRECTOR(A):** Carlos Gerardo Hernández Capacho

### RESUMEN

El desarrollo del trabajo de grado consistió en la puesta en funcionamiento del módulo de presión PROCON 38-714 de Feedback y el desarrollo de algunas guías de laboratorio que garantizaran el correcto funcionamiento del módulo. La metodología desarrollada consistió en realizar un mantenimiento mecánico de las partes que comprenden el módulo existente en el Laboratorio de Control de Procesos K306 de la Universidad Pontificia Bolivariana, el cual fue adquirido en el año 1999 y durante varios años ha estado en desuso debido al mal funcionamiento de los transmisores. Afortunadamente junto al módulo de presión existen otros dos módulos: uno de temperatura y otro de nivel; los cuales usan los mismos componentes por ser de la misma línea del mismo fabricante y gracias a ello, se utilizaron algunos elementos de dichos módulos, para las pruebas iniciales. Una vez los elementos mecánicos estaban en correcto funcionamiento la tarea principal consistió en el diseño e implementación de los transmisores de presión, que garantizara valores en el protocolo de corriente de 4 a 20 miliamperios. Con el desarrollo de un prototipo de transmisor, se realizaron las pruebas correspondientes y se vio viable la realización de otros dos circuitos impresos que constituirían los transmisores definitivos del proyecto. Los transmisores de presión permitieron poner en funcionamiento el módulo de presión ya que estos transmisores son indispensables para la utilización de la interfaz de procesos y el controlador ABB que vienen con el módulo, lográndose implementar una prácticas de laboratorio, inicialmente para el manejo de la variable y del protocolo de corriente y otras para la realización de lazo cerrado implementando controladores PID.

### PALABRAS CLAVE:

Presión, Control de procesos, Controlador PID, protocolo industrial en corriente.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** ADAPTATION AND COMMISSIONING OF THE FEEDBACK PROCON 38-714 PRESSURE CONTROL MODULE

**AUTHOR(S):** Gloria Eliana Gutierrez Martínez

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

**DIRECTOR:** Carlos Gerardo Hernández Capacho

### **ABSTRACT**

The development of the work of degree consisted in the putting in operation the Feedback pressure PROCON 38-714 control module and the development of some guides for laboratory that guaranteed the correct operation of it. The methodology developed consisted the mechanical performing maintenance of parts that comprise the existing module in the K306 Process Control Laboratory of the Universidad Pontificia Bolivariana, which was acquired in 1999 and for several years has been in disuse due to the operation of the transmitters. Fortunately next to the pressure module there are two other modules: one for temperature and another for level; which use the same components for being from the same line of the same manufacturer and thanks to that, some elements of said modules were used for the initial tests. Once the mechanical elements were in correct operation, the main task was the design and implementation of the pressure transmitters, which would guarantee values in the current protocol from 4 to 20 milliamps. With the development of a transmitter prototype, the corresponding tests were carried out and it was possible to carry out two other printed circuits that would constitute the definitive transmitters of the project. The pressure transmitters allowed to put the pressure module into operation since these transmitters are indispensable for the use of the process interface and the ABB controller that come with the module, being able to implement a laboratory practices, initially for the management of the variable and of the current protocol and others for the realization of closed loop implementing PID controllers.

### **KEYWORDS:**

Pressure, Process control, PID controller, Industrial protocol in current

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCIÓN

En todo proceso industrial por muy sencillo que sea siempre es indispensable controlar y mantener variables bajo control es decir, dentro de unos valores deseados. Los procesos industriales pueden llegar a ser muy variados, pueden existir desde muy sencillos como la simple medición del nivel de un tanque, hasta la combinación de diversas variables para el control y manejo de una planta. La diversa fabricación de productos y suministro de servicios, exige un mínimo control de algunas magnitudes tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el PH, la conductividad, la velocidad, la humedad, el punto de rocío, etcétera. El uso de algunos instrumentos diseñados para la medición y control de variables permite el cuidado y la regulación de estas constantes para mantener en condiciones ideales el uso de estas dentro de un proceso. La importancia del empleo de estos instrumentos hace que el operario se libere de su contacto directo con la planta al mismo tiempo, le ha concedido unas labores mínimas de supervisión y vigilancia desde puntos remotos de control, que bien pueden ser situados en el propio proceso o en salas aisladas. El sistema de control que permite este mantenimiento de las variables puede definirse como aquel que compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto.

Hoy en día se hace inimaginable una industria en la que no exista ningún tipo de sensor debido a que la tecnología ha hecho posible su automatización y esto ha sido gracias, en parte, a la utilización de sensores. Debido a la enorme importancia que tienen los sensores en el ámbito industrial se hace necesario, al menos, una asignatura en todos los programas de ingeniería de control o electrónica, dedicada a este campo.

Un equipo didáctico con implementación de instrumentos industriales ayuda a comprender el significado práctico y teórico de los transductores, permite a los usuarios conocer el funcionamiento de los acondicionadores de señal y adquirir las habilidades de interpretar un plano de instrumentación junto con la documentación técnica y hojas de datos.

La Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga posee en su Laboratorio de Control de Procesos tres plantas didácticas que tienen todos los elementos necesarios para la realización de prácticas de laboratorio de instrumentación y control con un ambiente industrial, debido a que los elementos que posee son de manejo cotidiano en la industria. Estos equipos son:

- Planta de Control de nivel y flujo
- Planta de Temperatura
- Planta de Presión.

El presente trabajo de grado se realizó en la planta de Presión, la cual tiene un circuito que es alimentado por una fuente de flujo que es regulado manualmente para limitar su máximo valor y este flujo a su vez es controlado automáticamente

con una válvula de Presión con protocolo 3 a 15 PSI. Tiene dos sensores de presión electrónicos: uno fijo y otro para presión diferencial.

Las plantas mencionadas anteriormente manejan protocolo de 4 a 20mA y estas señales son llevadas hacia y desde la interfaz de procesos donde se reúnen estos lazos de corriente permitiendo interactuar con un controlador industrial PID de la marca ABB.

Este trabajo de grado, se centra en el diseño e implementación de un circuito impreso de acople de señal 4 a 20mA de la planta de presión anteriormente descrita. Además se verificarán y se realizarán unas prácticas para el laboratorio de la asignatura sistemas de control I y otras áreas afines.

El presente documento se encuentra dividido en dos capítulos iniciales que tratan del fundamento teórico y de la metodología desarrollada durante el desarrollo de la tesis, seguidamente están el análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Adecuación y puesta en funcionamiento del Módulo Control de Presión Procon 38-714 de la marca Feedback para uso en el Laboratorio Control de Procesos de la Universidad Pontificia, Seccional Bucaramanga.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar y adecuar físicamente los componentes mecánicos y electrónicos del módulo de Control de Presión.
- Diseñar e implementar los transmisores electrónicos de presión para el módulo Control de Presión.
- Elaborar las guías de laboratorio del módulo Control de Presión, para ser empleadas en el laboratorio Control de Procesos.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 PRESIÓN

Según la real academia española define presión como la magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie y cuya unidad en el sistema internacional es el pascal [1].

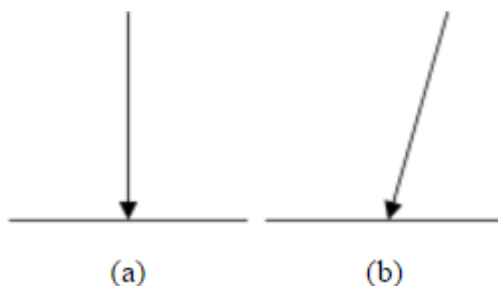
Otras definiciones similares de presión la pueden definir como la magnitud que indica cómo se distribuye la fuerza sobre la superficie a la cual esta aplicada [2].

La medida de la presión se puede calcular entonces dividiendo la intensidad de la fuerza por el área de la superficie. Como se observa en la ecuación 1.

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

Por ser el cociente que resulta de dividir dos magnitudes escalares, la presión es también un escalar. (La fuerza es una magnitud vectorial, pero la intensidad de la fuerza es un escalar). Es importante tomar en cuenta que la fuerza debe estar aplicada a la superficie. Por ejemplo se considera el siguiente caso de la figura 1 [3].

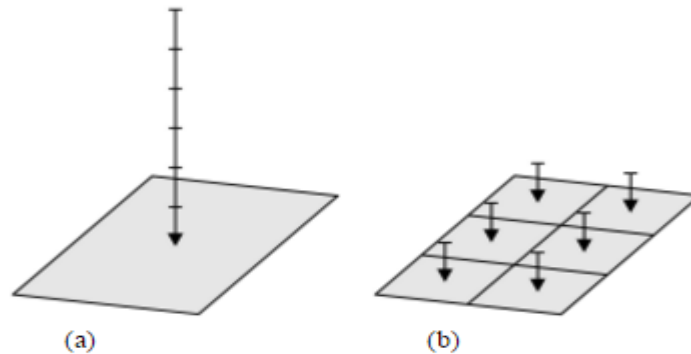
Figura 1. Diagrama de fuerzas aplicadas.



Fuente: [3]

En la figura 1a. la fuerza aplicada es a la superficie. En el segundo “figura 1b.” solo una parte de ella lo está aplicando a la superficie y debe ser considerada a la hora de calcular la presión. La presión es generada por la interacción entre una superficie y sustancias en estado gaseoso o líquido. Un punto importante a distinguir es que los líquidos transmiten presiones y los sólidos transmiten fuerzas [3].

Figura 2. Diagrama de distribución de fuerzas.



Fuente: [3]

La figura 2, muestra el concepto de distribución en una superficie, en esta se aprecia cómo para cada unidad de intensidad se proporciona una unidad de área, brindando una idea de distribución de la fuerza que genera una presión [3].

## 1.2 UNIDADES DE LA VARIABLE PRESIÓN

La unidad oficial para expresar las medida de presión es el pascal, quien hace referencia a un newton aplicado sobre un metro cuadrado y que en el sistema internacional equivale a  $1 \text{ kg}/(\text{ms}^2)$ . 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 la unidades con que se trabaja frecuentemente esta variable [4].

### 1.2.1 Pascal

Es una unidad de medida de presión del sistema internacional de unidades, su símbolo es Pa, se da su nombre en honor al francés Blaise Pascal.

Un pascal se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma [4].

### 1.2.2 Atmósfera

La unidad atmósfera se define en términos de la presión hidrostática que produce una columna de mercurio de 760 mm (o 76,0 cm) exactamente, a la temperatura de  $0^\circ\text{C}$ . a nivel del mar se denomina presión atmosférica estándar, se usa como unidad de presión la atmosfera cuya abreviación es "atm" [4].

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101,33 \text{ kPa}$$

### 1.2.3 Torr

Otra unidad de medida es el torr o la presión hidrostática de una columna de mercurio de 1 mm, en las mismas condiciones de gravedad y temperatura que la presión de una 1 atm. Su nombre es en honor a Torricelli, quien realizó un

experimento que permite medir la presión en base al desplazamiento del mercurio [4].

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

$$1 \text{ torr} = 133,32 \text{ Pa}$$

#### 1.2.4 Baria

Esta unidad de medida pertenece al sistema cegesimal de unidades (CGS), para esta unidad no existe un símbolo determinado, se designa con su propio nombre. Se define como la aplicación de una fuerza de una dina actuando sobre una superficie de un centímetro cuadrado [4].

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

### 1.3 TIPOS DE PRESIÓN

Es importante saber la presión que se está midiendo debido a que se puede distinguir entre diferentes tipos de presión. A continuación se muestra cada una.

#### 1.3.1 Presión absoluta

La presión absoluta se mide en relación al vacío total o al cero absoluto de presión [5].

#### 1.3.2 Presión atmosférica

Esta es la fuerza que el aire ejerce sobre la atmosfera, en cualquiera de sus puntos. Lo que ocurre con esta presión es que cuando el aire está a baja temperatura desciende, aumentando así la presión, en caso contrario de que el aire se encuentre en altas temperaturas sube, bajando la presión [5].

En pocas palabras se puede definir como la presión ejercida por la atmosfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar esta presión es aproximadamente.

$$760 \text{ mm de Hg absolutos}$$

$$1,01325 \text{ bar}$$

#### 1.3.3 Presión relativa

Es la presión que se calcula tomando en cuenta la presión atmosférica, donde su valor que es cero es el valor de la presión absoluta. Se calcula con la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta. La presión relativa se mide tomando como origen o cero de la escala la presión atmosférica a nivel del mar. Si desea medir la presión relativa de un gas o líquido contenido en recipientes cerrados se utiliza el manómetro [4].

#### 1.3.4 Presión diferencial

La presión diferencial es la diferencia entre un determinado valor de presión y otro de valor de referencia. De hecho se podría considerar también la presión absoluta



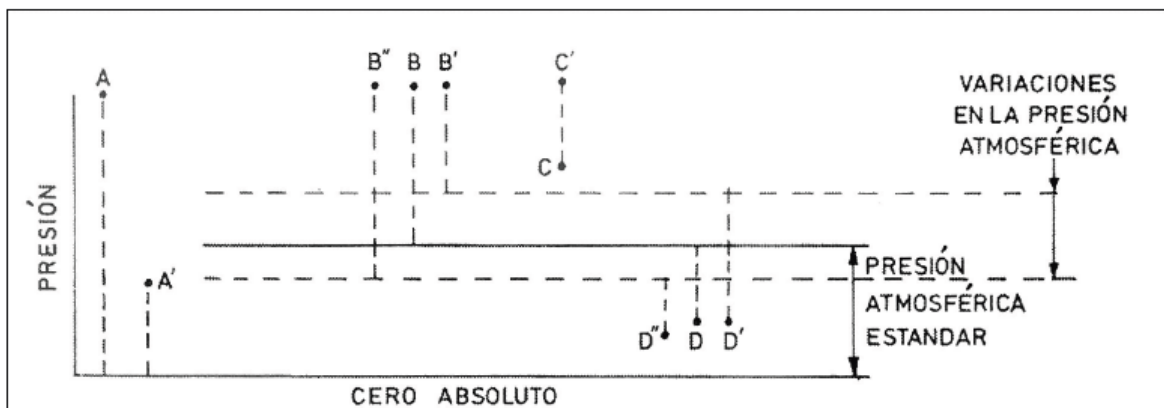
como presión diferencial basada en el vacío como referencia o la presión relativa en comparación con la presión atmosférica [6]. Se puede decir que la presión diferencial es el resultado de la diferencia de dos medidas de presiones que tiene el mismo cero de referencia.

### 1.3.5 Vacío

Diferencia de presiones entre la presión atmosférica y la presión absoluta, es decir la presión medida por debajo de la atmosfera.

Los diferentes tipos de presiones se observan en la siguiente figura.

Figura 3. Tipos de presión.



Fuente: [3]

- ❖ A y A' => Presión absoluta.
- ❖ B, B' y B'' => Presión relativa.
- ❖ C y C' => Presión diferencial.
- ❖ D, D' y D'' => Presión de vacío.

## 1.4 ELEMENTOS DE MEDICIÓN

A la hora de querer efectuar una medida de presión en el mercado se encuentran diferentes instrumentos que permiten registrar, controlar, indicar entre otras opciones, los cuales se clasifican de la siguiente manera.

### 1.4.1 Mecánicos

Son elementos primarios de medición que pueden dar lectura directa o ser parte de los electromecánicos. Se usan en los procesos como instrumentos de campo.

Estos se clasifican en:

#### a. Elementos primarios de medida directa

Estos elementos miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y alturas conocidas. Entre estos se encuentran [7]:

- Manómetro de tubo en U.
- Manómetro de pozo.
- Manómetro de tubo inclinado.

#### **b. Elementos primarios elásticos.**

Estos elementos se deforman por la presión interna del fluido que contienen [7]. Dentro de ellos se encuentran:

- Tubo de Bourdon.
- Diafragma.
- Fuelle.

#### **1.4.2 Elementos neumáticos**

Como elementos neumáticos se tienen los instrumentos transmisores neumáticos cuya variable de medida es la presión adecuada al campo de medida correspondiente. El tipo de transmisor queda establecido por el campo de medida del elemento [7].

#### **1.4.3 Elementos electromecánicos**

Son instrumentos que basan su funcionamiento en elementos mecánicos utilizando un transductor de presión; estos dispositivos electromecánicos son 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 eléctricos de donde se adquiere la información.

Algunos de estos elementos son:

- Transductor de presión resistivo.
- Transductor de presión capacitivo.
- Transductor de presión magnética.
- Transductor piezoeléctrico

### **1.5 TRANSMISORES DE PRESIÓN**

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica, digital, óptica, hidráulica o por radio [8].

En general la señal neumática es de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada). La señal electrónica normalizada es de 4 a 20mA de corriente continua, si bien se utilizan de 1 a 5mA c.c., de 10 a 50mA c.c. y de 0 a 20mA c.c. [8].

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 32 bits entonces puede enviar 32 señales binarias (0 y 1) simultáneamente [8].

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

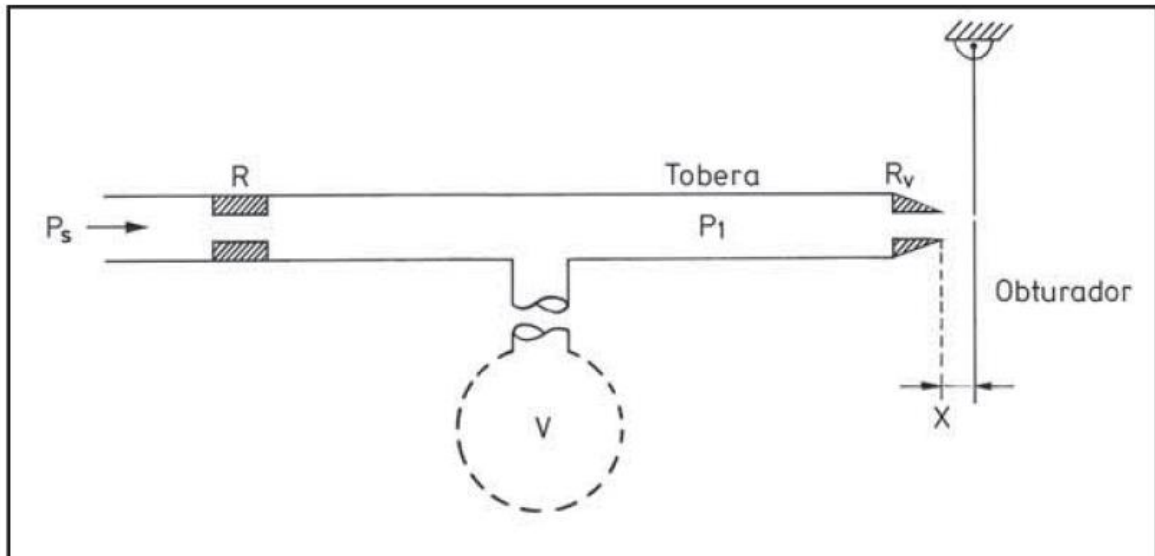
- $\pm 0,5\%$  en los transmisores neumáticos.
- $\pm 0,3\%$  en los transmisores electrónicos.
- $\pm 0,15\%$  en los transmisores "inteligentes" con señal de salida de 4 a 20mA c.c.
- $\pm 0,1\%$  en los transmisores digitales.

### 1.5.1 Transmisores neumáticos

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o de fuerzas, convierte el movimiento del elemento primario de medición a una señal neumática de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada). Siendo su exactitud del orden del  $\pm 0,5\%$  [8].

Los transmisores neumáticos, al tener el diámetro de la tubería muy pequeño, del orden de 0,1 a 0,2 mm, son susceptibles de mal funcionamiento debido a las 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 [8].

Figura 4. Trasmisor neumático

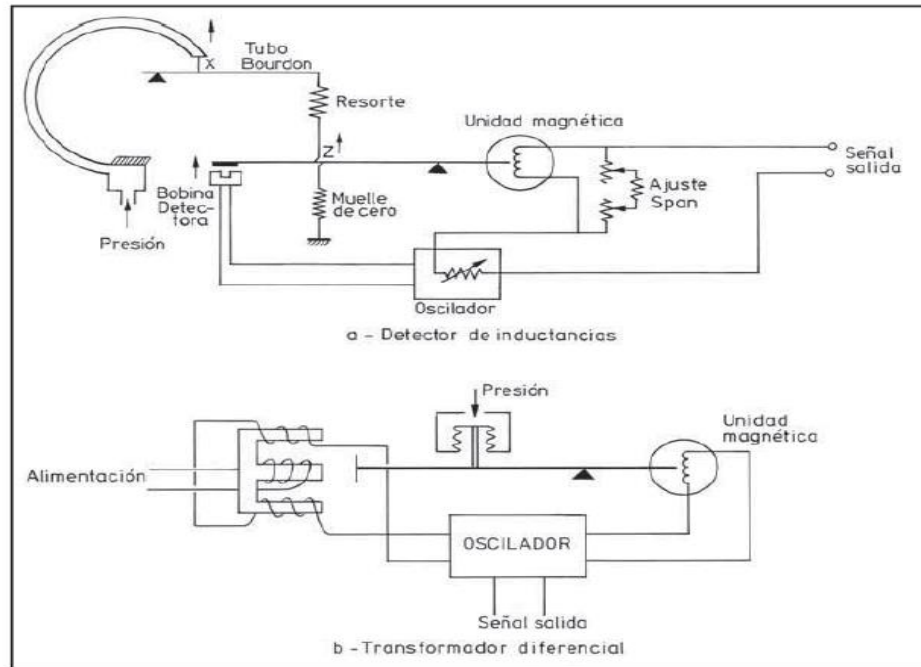


Fuente: [8]

### 1.5.2 Transmisores electrónicos

Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone, o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20mA c.c. Su exactitud es del orden del  $\pm 0,5\%$  [8].

Figura 5. Transmisor electrónico

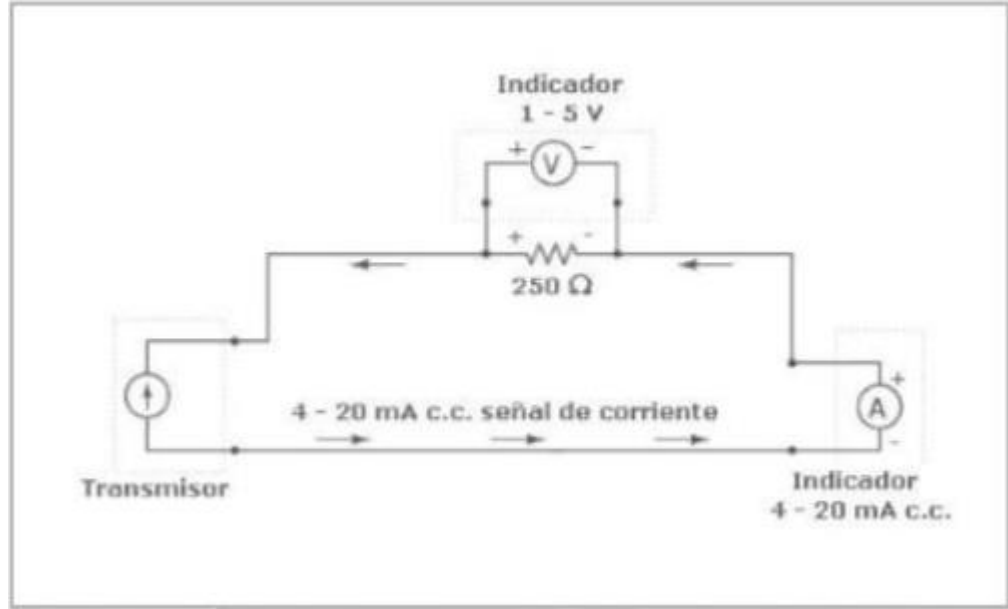


Fuente: [8]

Análogamente a los instrumentos neumáticos, no pueden guardar las señales de planta, y además son sensibles a vibraciones, por cuyo motivo su empleo ha ido disminuyendo [8]

El transmisor electrónico se alimenta con una fuente de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos. El receptor dispone de una resistencia de 250 ohmios conectada en los bornes de entrada. De este modo, la señal de salida del transmisor varía de 4 a 20mA c.c. [8]

Figura 6. Señal electrónica 4 a 20mA cc 1 a 5Vdc



Fuente: [8]

### 1.5.3 Transmisor digital

Cuando apareció la señal digital aplicable a los transmisores, mejoró notablemente la exactitud conseguida en la medida. La señal del proceso es muestreada a una frecuencia mayor que el doble del de la señal (teorema de muestreo de Nyquist-Shannon) y de este modo, la señal digital obtenida consiste en una serie de impulsos en forma de bits.

Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal es de 16 bits entonces puede manejar 16 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 16 cifras:

$$1111111111111111 = 1 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + \dots + 1 \times 2^{15} = 65.535$$

La exactitud de la señal digital de 16 bits es de:  $(1/65.535) \times 100 = \pm 0,0015\%$

El valor anterior no se puede considerar 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 compensación en las variaciones de temperatura y tensiones de referencia de los transmisores y autoajuste desde el panel de control, grabación de datos históricos, rangeabilidad, autocalibración, entre otras.

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. De este modo se mejora la exactitud de los datos y la fiabilidad [8].

#### **1.5.3.1 Protocolo hart y lazo de control 4 a 20mA**

El protocolo HART (acrónimo en inglés de highway addressable remote transducer) es un protocolo abierto de uso común en los sistemas de control, que se emplea para la configuración remota y supervisión de datos con instrumentos de campo. La comunicación de dispositivos inteligentes, se hace utilizando un lazo de corriente de 4 a 20mA para lograr tal fin. El protocolo fue 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 [9].

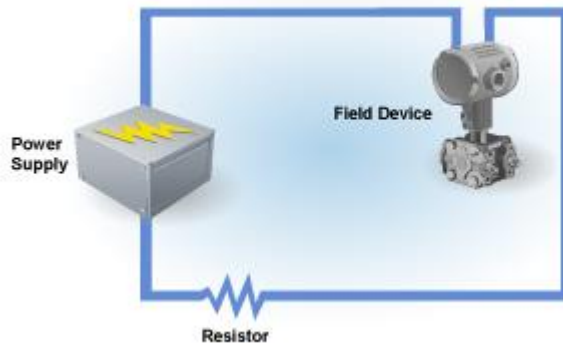
Ningún otro proceso tecnológico se le aproxima en cuestiones de comunicación, alcance de instalación y efectividad general, por lo que hoy en día los fabricantes de dispositivos inteligentes y proveedores en general continúan produciendo dispositivos HART en cifras significativamente importantes. Cerca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

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 20mA. 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 agregó 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 funcione 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 [10].

#### **1.5.3.2 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 la tensión y la corriente tengan la misma forma es necesaria la presencia de un elemento puramente resistivo. La caída de voltaje se registra en la resistencia, la cual no constituye ninguna carga para el circuito, pero es necesaria [10].

Figura 7. Comunicación punto a punto

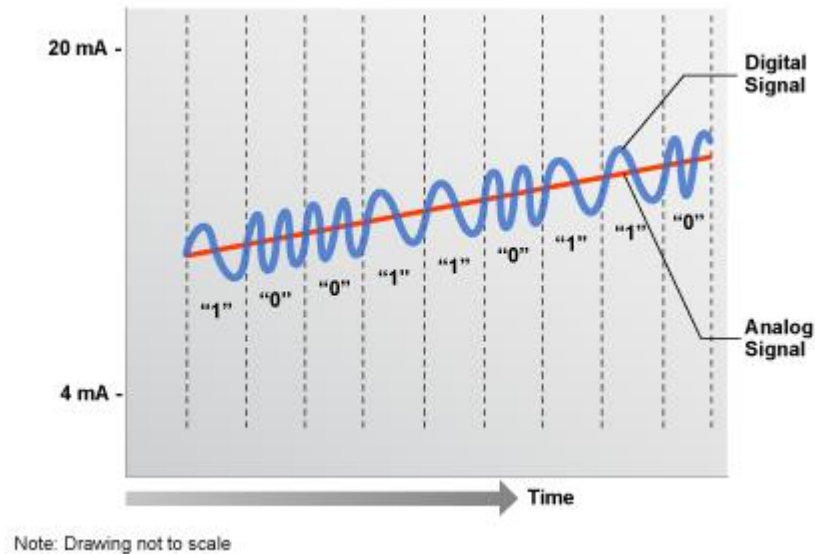


Fuente: [10]

La comunicación HART necesita un voltaje de alimentación y la cantidad de voltaje que el lazo necesita está en función de la distancia del mismo, además de la resistencia que presenta el receptor y la generada por el lazo [10].

- ❖ 4mA representa el nivel de salida cero del sensor y 20mA representa la salida de plena escala del dispositivo.
- ❖ Un receptor en un extremo remoto convierte la corriente a un voltaje que oportunamente será procesado por el ordenador o PLC.
- ❖ El valor de la corriente no es afectada en todo el lazo por las caídas del voltaje en el cable.
- ❖ Es inmune a muchos de los tipos de ruido que interfieren en las comunicaciones convencionales.
- ❖ La señal HART consiste en una señal superpuesta a la señal analógica de 4 a 20mA.
- ❖ 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.

Figura 8. Modulación ASK en HART, señal digital sobre la análoga de 4 a 20mA



Fuente: [10]

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

2200 Hz= 0 Lógico

1200 Hz= 1 Lógico

- ❖ Las frecuencias anteriormente mencionadas constituyen valores lógicos que permiten la creación del protocolo de comunicación HART.
- ❖ El Protocolo HART se comunica a 1200 bps sin interrumpir la señal de 4 a 20mA 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 20mA permite la medición de una única variable, mientras que la utilización del protocolo HART permite la supervisión de más variables.
- ❖ 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.
- ❖ La comunicación HART permite verificar el estado de los dispositivos y realizar diagnósticos, con el fin de saber si el valor está fuera de los límites máximos del dispositivo o fuera de rango. Esto permite configurar las alarmas de alto o bajo.
- ❖ 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 tensión pueden afectar las variaciones en frecuencia.



### **1.5.3.3 Beneficios del Protocolo HART:**

- ❖ Aprovechar las capacidades de los dispositivos inteligentes y jugar con sus datos para realizar mejoras operativas.
- ❖ Tener información temprana de variaciones de rendimiento en los dispositivos, productos o procesos.
- ❖ Hacer más breve el tiempo de identificación y corrección de inconvenientes entre el diagnóstico y la solución.
- ❖ Valorar de manera continua el estado de los circuitos y estrategias del sistema de control.
- ❖ Aumentar la productividad del equipo y disponibilidad del sistema.
- ❖ Integrar dispositivos y sistemas para detección de problemas de difícil diagnóstico.
- ❖ Descubrir en tiempo real problemas de conexión en dispositivos y/o procesos.
- ❖ Minimizar el impacto de errores en el proceso al proporcionar advertencias oportunas.
- ❖ Evitar el alto costo que traen consigo los paros e interrupción en el proceso.
- ❖ Verificación y valoración eficiente de circuitos de control.
- ❖ Configuración remota de dispositivos.
- ❖ Utilización de diagnósticos remotos con el fin de disminuir las pruebas de campo innecesarias.
- ❖ Captura de datos de tendencias para diagnóstico de mantenimiento predictivo.
- ❖ Reducción del inventario de refacciones y costos de administración de dispositivos.
- ❖ Facilitar la prueba de paros automáticos de seguridad.
- ❖ Permite realizar diagnósticos avanzados, lo cual eleva los niveles de seguridad.
- ❖ Utilización de dispositivos multivariables para informes más precisos y completos.

### **1.5.3.4 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.
- ❖ Es implementado en su mayoría para el monitoreo de variables, equipos y ajuste de los mismos.
- ❖ A pesar de ser muy intuitivo, puede ser necesario entrenamiento para puesta en marcha, solución de problemas y calibración.
- ❖ Requiere estar aterrizado y aislado de manera adecuada para evitar errores de comunicación en la red [10].

## **1.6 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.

### **1.6.1 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 [11].

#### **1.6.1.1 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 [12].

#### **1.6.1.2 Metrología industrial**

Comprende todas las actividades de un sistema de gestión de medidas que necesita la industria para cumplir con los objetivos de calidad y gerencia, como lo es la información sobre mediciones, las calibraciones, la trazabilidad, el servicio de calibración, el aseguramiento de la calidad, entre otras. La metrología industrial interviene en los procesos industriales, cobrando en ellos un importante papel en cualquier sistema de calidad aplicado a fabricación [13].

#### **1.6.1.3 Metrología científica**

También conocida como "metrología general". Es la parte de la Metrología que se ocupa a los problemas comunes a todas las cuestiones metrológicas, independientemente de la magnitud de la medida. Se encarga de la investigación de unidades de medición, además de la custodia, mantenimiento y trazabilidad de los patrones, instrumentos, métodos y procedimientos; mediante un conjunto de acciones que apremian el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades base y derivadas del sistema internacional de unidades, SI. Se ocupa de los problemas teóricos y prácticos relacionados con las unidades de medida, como la estructura de un sistema de unidades o la conversión de las unidades de medida en fórmulas. [13]

## **1.6.2 Vocabulario metrológico**

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

### **1.6.2.1 Magnitud**

Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede expresarse cuantitativamente mediante un número o referencia [14].

### **1.6.2.2 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 [14].

### **1.6.2.3 Medición**

Es un proceso que permite obtener uno o varios valores de manera experimental; los cuales se atribuyen a una magnitud de manera razonable [14].

### **1.6.2.4 Dispositivo de Medida**

Dispositivo utilizado para realizar mediciones, solo o asociado a dispositivos suplementarios [14].

### **1.6.2.5 Instrumento de Medida con Dispositivo Indicador**

Instrumento de medida que produce y permite enviar señal con información sobre el valor de la magnitud medida [14].

### **1.6.2.6 Instrumento de Medida con Dispositivo Visualizador**

Instrumento indicador en el que la señal de salida se presenta en forma visual [14].

### **1.6.2.7 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 [14].

### **1.6.2.8 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 [14].

### **1.6.2.9 Transductor de Medida**

Dispositivo utilizado en medición, que hace corresponder a una magnitud de entrada una magnitud de salida, según una relación determinada [14].

#### **1.6.2.10 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 [14].

#### **1.6.2.11 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 [14].

#### **1.6.2.12 Ajustar**

Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir [14].

#### **1.6.2.13 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 mínimo que generalmente es cero [14].

#### **1.6.2.14 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 [14].

#### **1.6.2.15 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 [14].

#### **1.6.2.16 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 [14].

### **1.6.3 Normas**

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 [15].
- ❖ Son elaborados por consenso de las partes interesadas: Fabricantes, administraciones, usuarios, consumidores, centros de investigación, laboratorios, asociaciones y colegios profesionales [15].

- ❖ Están basados en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico [15].
- ❖ Son aprobadas por un organismo nacional, regional o internacional de normalización [15].
- ❖ Son de dominio público [15].

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 [15].

#### **1.6.3.1 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 [15].
- 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 [15].

#### **1.6.3.2 Normas aplicadas en el diseño de pruebas de laboratorio**

##### **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 ISO 17025 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 deben 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 condicione 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 [15].

#### **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 [15].

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 [15].

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 especial importancia [15].

#### **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 [15].

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 destreza al operar los instrumentos disminuye en gran cantidad los errores de medida. Cabe aclarar que los errores de los operarios con los instrumentos no son fuentes de incertidumbre [15].

#### 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:

- ❖ Barómetros empleados en servicios meteorológicos y de aviación civil [15].
- ❖ Manómetros usados para la supervisión de seguridad mecánica (calderas y tanques) [15].

Manómetros usados para la medición de las características de materiales (control de calidad) e industria de hidrocarburos [15].

Los patrones 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.

Figura 9. Manómetro de pistón



Fuente: [16]

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  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . 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.

**e. Manómetros indicadores de presión, manómetros de vacío y manómetros de presión y vacío para usos generales norma técnica colombiana (NTC 2263)**

Esta norma especifica las principales características metrológicas 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.

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.

**1.6.4 Normalización**

Es el proceso con el cual se elaboran, mejoran y aplican las normas en las 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 [15].

Es posible que la normalización posea uno o más objetivos específicos sin embargo, 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 puede haber casos especiales. También se puede encontrar la superposición entre objetivos [15].



#### **1.6.4.1 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 [15].

#### **1.6.4.2 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 [15].

#### **1.6.4.3 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.
- ❖ NSF: NSF International.
- ❖ UL: Underwriters Laboratories Inc [15].

#### **1.6.4.4 Organismo nacional de normalización y estandarización ICONTEC**

El 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 [15].

### **1.6.5 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 se aplican muchos estándares sin darse 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 [15].

### **1.6.6 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 [15].

#### **1.6.6.1 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 [15]

#### **1.6.6.2 Organismo nacional de acreditación**

En Colombia se cuenta con ONAC, que es el 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 [15].

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 [15].

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 [15].

#### **1.6.7 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.

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 [15].

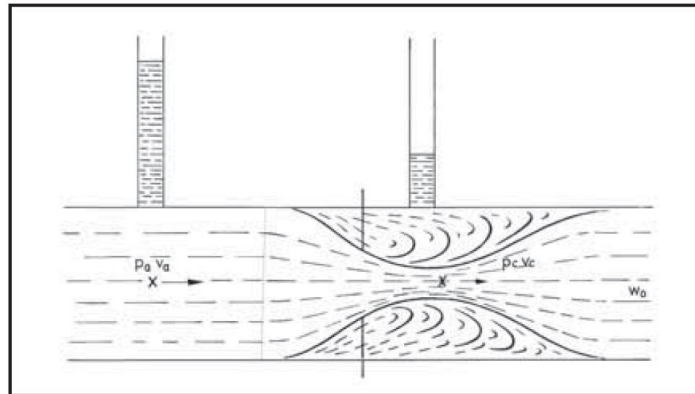
#### **1.7 MEDICIÓN DE CAUDAL BASADO EN PRESIÓN DIFERENCIAL**

Para la medición de caudal volumétrico se utiliza la técnica de medición de presión diferencial, para ello se emplean dispositivos como placa de orificios, tobera, tubo

Venturi, tubo Pitot y tubo Annubar [8]. En el módulo de presión de la presente tesis se tiene una placa de orificios para la medición de flujo.

Los elementos de presión diferencial están basados en la diferencia de presiones ocasionadas por un estrechamiento en el ducto por donde circula el fluido (líquido, gas o vapor) esta presión diferencial provocada por el angostamiento de la tubería es medida por dos instrumentos de presión ubicados aguas arriba y aguas abajo de dicho estrechamiento a una corta distancia [8]. En la Figura 10 se muestra la reducción del tubo y la ubicación de los sensores que miden las dos presiones en el punto a y el punto b además, se evidencian las presiones y velocidades.

Figura 10. Teorema de Bernulli



Fuente: [8]

El teorema de Bernoulli permite obtener la relación que existe entre el flujo y la diferencia de presión. Sean  $V_a$ ,  $P_a$  y  $V_c$ ,  $P_c$  las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa y  $S_a$ ,  $S_c$  las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_o} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_o}$$

y:

$$S_a V_a = S_c V_c$$

Siendo  $\rho_o$  la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que no varía en toda la longitud estudiada del tubo:

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2 \left( \frac{P_a - P_c}{\rho_o} \right)$$

Llamando  $d$  el diámetro del orificio y  $D$  el diámetro interior de la tubería aguas arriba:

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_o}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

Asumiendo  $\beta$  a la relación de diámetros  $\beta = d/D$  resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_o}}$$

Llamando  $E = 1/\sqrt{1 - \beta^4}$  al coeficiente de velocidad de acercamiento, resulta:

$$V_c = E \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_o}}$$

El caudal en volumen será:

$$Q_v = S_c V_c = E \frac{\pi^2 d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_o}} = K \sqrt{P_a - P_c}$$

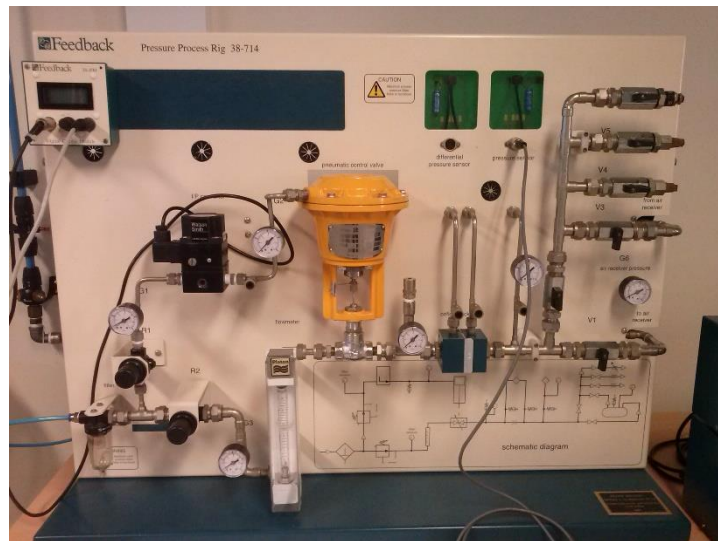
Mostrándose de esta manera que el flujo se halla mediante la medida del diferencial de presión, siendo el caudal proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión.

## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología desarrollada durante la tesis; esta metodología consistió en la solución al problema planteado como fue la puesta en funcionamiento de la planta de presión. Se presenta en este capítulo una descripción del módulo con sus elementos que lo conforman, la caracterización de los sensores electrónicos de presión, el diseño del circuito acondicionador de señal, diseño del circuito impreso y finalmente la puesta en servicio del módulo.

### 2.1 MÓDULO DE PRESIÓN

Figura 11. Módulo de presión Procon 38-714



Fuente: Elaboración propia

El módulo de presión es mostrado en la Figura anterior y consiste en una planta didáctica de la marca Inglesa Feedback que se encuentra en el laboratorio Control de Procesos K306 de la Facultad de Ingeniería Electrónica. Cuenta con un circuito de tubería de alta presión que contiene un tanque de almacenamiento. El circuito alimenta al tanque de almacenamiento y a su vez tiene la posibilidad el circuito de tomar el aire comprimido del tanque para recircularlo por el circuito de tubería.

A lo largo del circuito de presión se encuentran instrumentos de medida de presión con lectura máxima de 30 psi, un flujómetro marca Boston con rango máximo de lectura de 25 lt/min, válvulas manuales, válvulas de alivio para sobrepresión, una placa de orificios para medir presión diferencial, válvulas de salida con difusores graduables, además de una válvula neumática marca Boston la cual, es manejada por un conversor de corriente a presión marca Watson Smith. Estos sensores electrónicos son de la serie SDX del fabricante SenSym. La Figura 12 muestra el circuito integrado o sensor el cual, tiene unas boquillas de entrada que permiten directamente estar en contacto con la variable a medir mediante un ducto que es llevado desde la línea a medir al sensor. Estas boquillas ofrecen la posibilidad que

sea una lectura **diferencia** de presión o una lectura directa o única es decir, comparada con la presión atmosférica dejando una boquilla al aire.

Figura 12. Sensor SDX15D4 de SenSym



Fuente: [17]

Los sensores ofrecen la posibilidad de entrega de voltaje de 0 a 150mV según los niveles de presión de la planta, con una alimentación de 12 voltios.

El módulo cuenta con la posibilidad de lectura de presión directa y presión diferencial mediante los sensores electrónicos; el primero con conexión directa y el segundo mediante de una platina de orificios dispuesta en la línea de la tubería de alta presión.

Además del panel frontal que contiene los instrumentos y sensores, el módulo lo compone también una interfaz de proceso y de un controlador industrial de la marca ABB con referencia Commander 300, los cuales permiten la alimentación en voltaje de los actuadores y desde donde se controla el proceso. La interfaz de proceso y el controlador se muestran en la Figura 13, en la parte frontal se muestran los terminales de conexión y en la parte posterior los cables de acceso a alimentación de 120V.

Figura 13. Interfaz de Proceso y Controlador ABB Commander 300



Fuente: Elaboración Propia.

El módulo en su pleno funcionamiento logra desarrollar temática de control automático con implementación de controladores PID, teniendo para ello que alimentar el sistema con aire comprimido con valores de presión mínimos de 30 psi.

El módulo de presión que fue adquirido por la Universidad Pontificia Bolivariana en 1999, presentó problemas de funcionamiento luego de un tiempo de haber sido

adquirido por daño en su transmisor de presión es decir, el circuito electrónico que lleva la información del sensor de presión en el cual se aplica una instrumentación para ser convertida al protocolo de 4-20mA. Su uso se limitó a la caracterización del actuador o válvula neumática mediante el conversor de corriente a presión I/P Watson Smith, usando el circuito de alta presión, limitando de esta manera el potencial de uso de este módulo de procesos.

En el trabajo desarrollado, Inicialmente se intervino la planta de presión para la adecuación de sus elementos mecánicos junto con sus instrumentos. Para ello se lubricaron los elementos móviles, se reubicaron algunos sensores de presión ya que algunos ya no estaban en el módulo y varios de ellos no presentaban un funcionamiento adecuado, se repararon otros y se revisaron los elementos que se encontraron, junto con la interfaz de proceso y su controlador ABB.

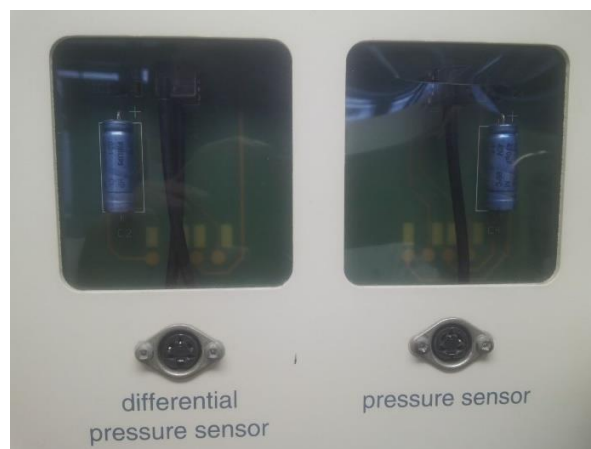
El circuito que contenía los sensores de presión no funcionaba conforme a lo que el fabricante garantizaba, para lo cual fue necesario intervenir la tarjeta que contiene los sensores, ya que previamente habían tenido un mantenimiento correctivo ya que seguramente se creía en ese entonces, que el mal funcionamiento del transmisor pudo provenir desde la tarjeta de los sensores.

Una vez reubicados y adecuados nuevos sensores en la tarjeta o circuito impreso que contiene los sensores, se verificó la variación del voltaje de salida de los sensores conforme variaba la presión, se procedió con la siguiente etapa en el desarrollo del proyecto.

## 2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

La caracterización de los sensores se realizó alimentando el circuito a 12 voltios. En la Figura 14 se muestran los dos circuitos impresos que contienen los sensores electrónicos de presión.

Figura 14. Sensores de presión



Fuente: Elaboración propia

A los sensores electrónicos se puede acceder mediante conector DIN de 5 terminales los cuales entregan un voltaje diferencias comprendido de 0 a 150mV.



Los sensores están directamente en contacto con la presión a medir gracias a que sus boquillas van a ductos plásticos de color negro que se empalman a ductos metálicos fijos en el panel frontal los cuales están conectados a la platina de orificios (para una medida de presión diferencial de presión) y el otro a la línea directamente, para contrastar la medida entregada por los sensores en voltaje se cuenta con indicadores de presión tipo Gauss G4 y G5 como se ilustra en la Figura 15.

Figura 15. Conexión de los sensores de presión



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas se realizaron para los dos casos, para la media directa se variaba las válvulas manuales de entrada o salida según se deseaba aumentar o disminuir la presión y se lograba tomar las lecturas contrastadas con el indicador de carátula G5 directamente, para la lectura de la presión diferencial es necesario realizar la diferencia de las lecturas de los dos indicadores G4 y G5. A continuación se muestran las tablas y las gráficas producto de la caracterización de los sensores realizando variaciones de presión cada 5 psi. La Tabla 1 presenta los datos obtenidos para el sensor directo, su gráfica es mostrada en la Figura 16. La Tabla 2 contiene los datos obtenidos para el sensor diferencial, su gráfica es mostrada en la Figura 17. Para los dos casos se obtiene una respuesta lineal y de manera similar, casi idéntica. Las lecturas tomadas se repitieron varias veces lográndose de manera cuantitativa una muy buena repetibilidad de la medida y una histéresis imperceptible, lo cual de manera analítica dio como resultado una excelente respuesta del sensor ante variaciones de presión dentro de los rangos permisibles de la planta. Estas lecturas de voltaje fueron tomadas como voltaje diferencial directamente con el voltímetro en una baja escala tomando como lectura de presión la que arrojaba los

indicadores de carátula, sin embargo teniendo en cuenta estos posibles errores de lectura los resultados arrojaron una caracterización lineal de los sensores.

Tabla 1. Caracterización del sensor directo

Presión	0 psi	5 psi	10 psi	15 psi	20 psi	25 psi	30 psi
Voltaje	0 mV	25.2 mV	50 mV	76 mV	101.3 mV	127 mV	150 mV

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Caracterización del sensor directo

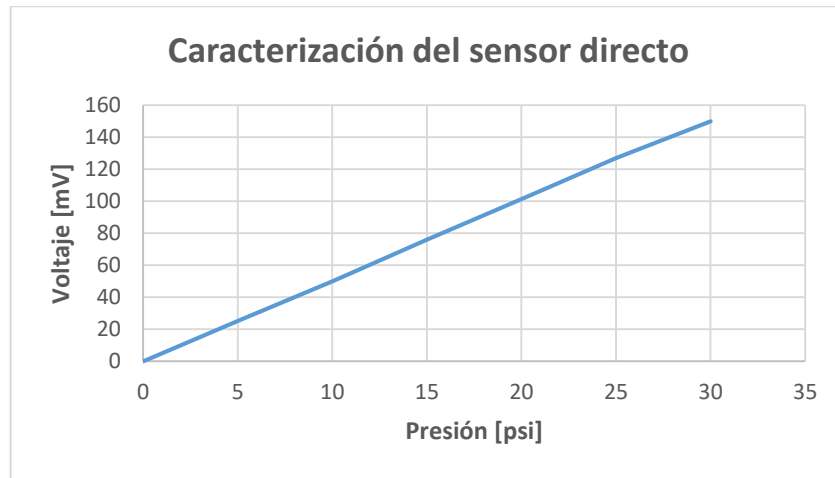
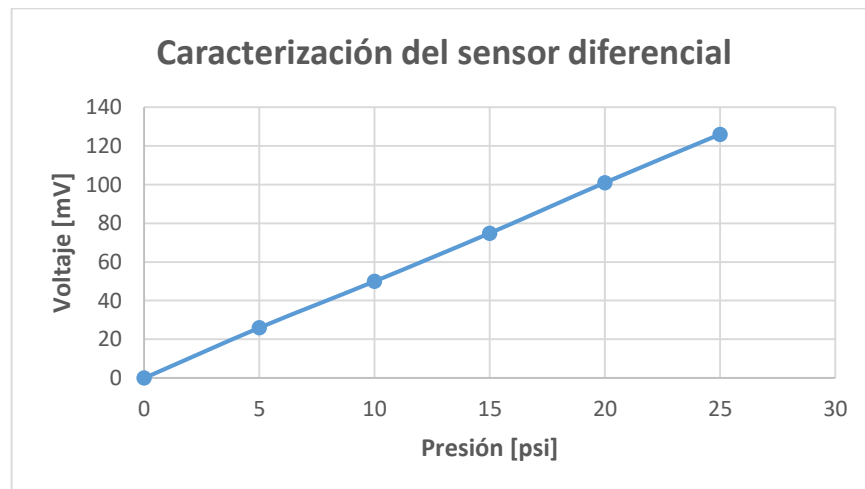


Tabla 2 Caracterización del sensor diferencial

Presión	0 psi	5 psi	10 psi	15 psi	20 psi	25 psi
Voltaje	0 mV	26 mV	50 mV	74.9 mV	101 mV	126 mV

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Caracterización del sensor diferencial



Fuente: Elaboración propia.

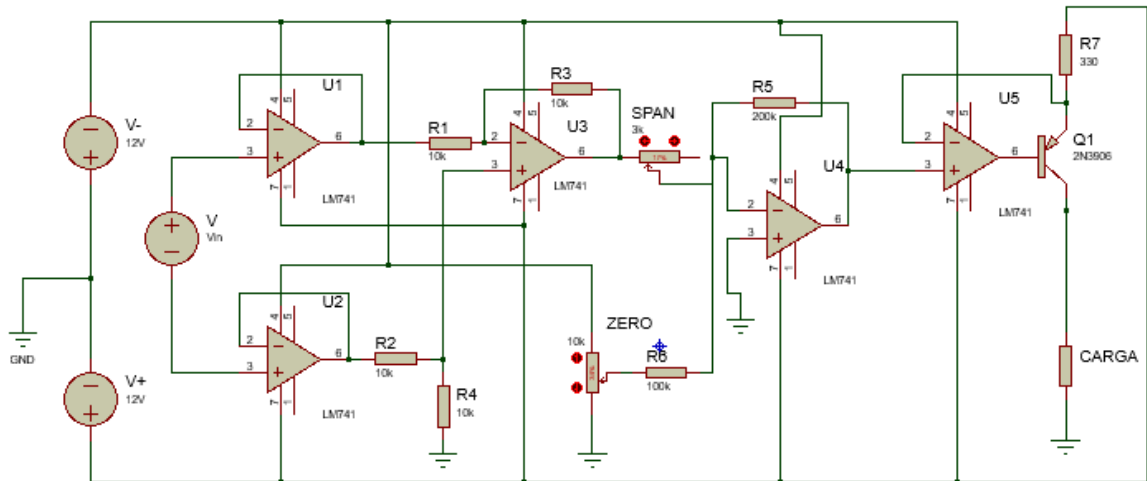
La respuesta presentada por los dos sensores es completamente lineal y tienen la misma característica, esta respuesta abre el camino para el diseño del circuito acondicionador para este tipo de respuesta basada en esto datos experimentales que según el fabricante, debería ser lineales y del valor de la alimentación fijada, que para el caso de la presente tesis fue de 12 voltios.

## 2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL

A continuación se presenta el diseño del circuito acondicionador de señal basado en los datos experimentales logrados.

En la Figura 18 se muestra el circuito acondicionador de señal que tiene como objetivo convertir los valor de voltaje de entrada es decir, los voltajes de los sensores a valores del protocolo en corriente de 4-20mA para ser entregados al lazo de corriente.

Figura 18. Circuito acondicionador de señal



Fuente: Elaboración propia

El diseño está basado en cinco amplificadores operacionales, de los cuales los dos primeros son empleados para el acople de impedancia en su configuración de seguidor de tensión, el tercero es empleado en su configuración diferenciador (sumador restador de ganancia 1) con  $R_1 = R_2 = R_3 = 10K\Omega$  para tener en su salida un voltaje referido a tierra, es decir el voltaje diferencial tomado desde el sensor de presión es llevado por la salida del tercer amplificador operacional a un voltaje referenciado.

El cuarto amplificador operacional en su configuración sumador inversor, realiza el acondicionamiento de los niveles de voltaje y dichos niveles acondicionados son los que el quinto operacional que incluye el transistor, en su configuración de conversor de voltaje a corriente, logra valores de corriente de 4-20mA.

En el conversor de voltaje a corriente se desean unos valores definidos de corriente que junto con el valor asignado de la resistencia  $R_7 = 330\Omega$  se requiere:

$$I_{min} = 4 \text{ mA} = \frac{12 \text{ V} - V_A}{330\Omega} \Rightarrow V_A = 10.68 \text{ V}$$

$$I_{max} = 20 \text{ mA} = \frac{12 \text{ V} - V_B}{330\Omega} \Rightarrow V_B = 5.4 \text{ V}$$

Siendo  $V_A$  y  $V_B$  valores extremos del rango de voltaje necesarios en la salida del quinto amplificador operacional, que garantizan los valores de corriente requeridos.

Una vez logrados los valores de voltajes requeridos por el conversor de voltaje a corriente, es necesario acondicionar los valores de voltaje provenientes del sensor a dicho rango de valores, para ello se soluciona el sistema de ecuaciones propuesto a continuación que corresponde a la configuración sumador inversor del cuarto amplificador operacional. Para ello se toman como valores mínimo de voltaje 0 voltios y máximo de 150 mV correspondientes al rango de valores mínimo y máximo que logran entregar los sensores conforme se tiene definido que la presión mínima es de 0 psi y de 30 psi respectivamente como lo muestran las tablas de la caracterización de los sensores.

$$\begin{cases} 10.68 \text{ V} = -m(0) - b \rightarrow \langle 4\text{mA} \rangle \\ 5.4 \text{ V} = -m(150\text{mV}) - b \rightarrow \langle 20\text{mA} \rangle \end{cases}$$

Siendo:  $m = \frac{R_5}{R_7}$ ;  $b = V_{ZERO} \frac{R_5}{R_6} \rightarrow m = 35.2$ ;  $b = -10.68 \Rightarrow \text{con } R_5 = R_6 = 100\text{K}\Omega$  :

Se obtiene:  $V_{ZERO} = -10.68 \text{ V}$ ;  $R_{SPAN} = 2.84\text{K}\Omega$

Estos últimos valores corresponden a los que se requieren de voltaje de manejo por el potenciómetro ZERO y en Ohmios de  $R_{SPAN}$ . Los cuales son a su vez los que se logran ajustar como ZERO y SPAN desde la carátula frontal del transmisor de corriente final, cumpliendo su cometido respectivo.

### 2.3 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

Una vez se realizaron las pruebas experimentales necesarias con el circuito diseñado en un montaje elaborado en protoboard y se verificó su adecuado funcionamiento; se procedió al diseño del circuito impreso empleando el software de diseño de circuitos impresos Eagle de la marca Cadsoft en su versión libre o de prueba. Para ello fue necesario inicialmente tomar las medidas donde el circuito final quedaría dispuesto es decir, las medidas de la caja plástica y de la carátula metálica destinadas para tal fin como se muestra en la Figura 19 y Figura 20 respectivamente, de esta manera sería un nuevo circuito impreso alojado en la misma caja donde estaba el circuito original, con sus medidas justas para fijar mediante tornillos con tuercas el circuito impreso a la carátula y ellos a su vez fijados a la caja a través de tornillos golosos, tal como originalmente estaban los circuitos.

Figura 19. Caja del transmisor



Fuente: Elaboración propia

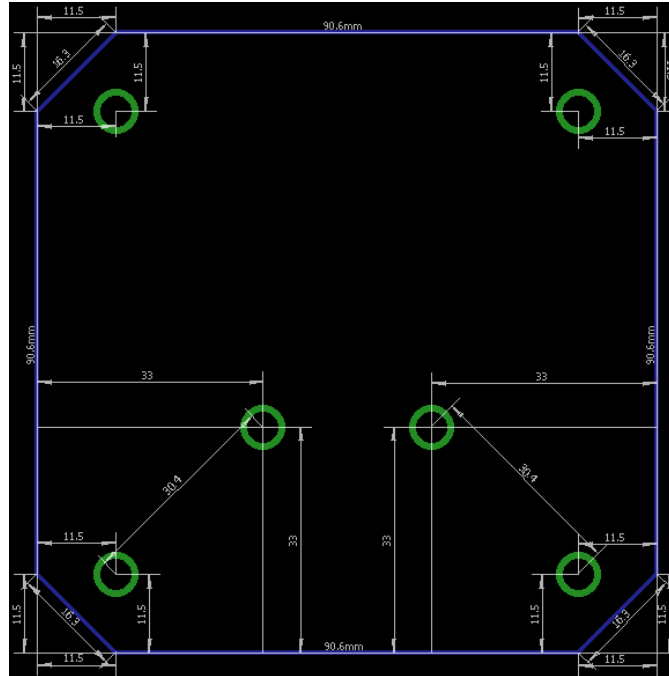
Figura 20. Carátula original del transmisor



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se muestran las medidas laterales y los agujeros correspondientes para fijar el circuito impreso en la carátula metálica del transmisor.

Figura 21. Medidas laterales del circuito



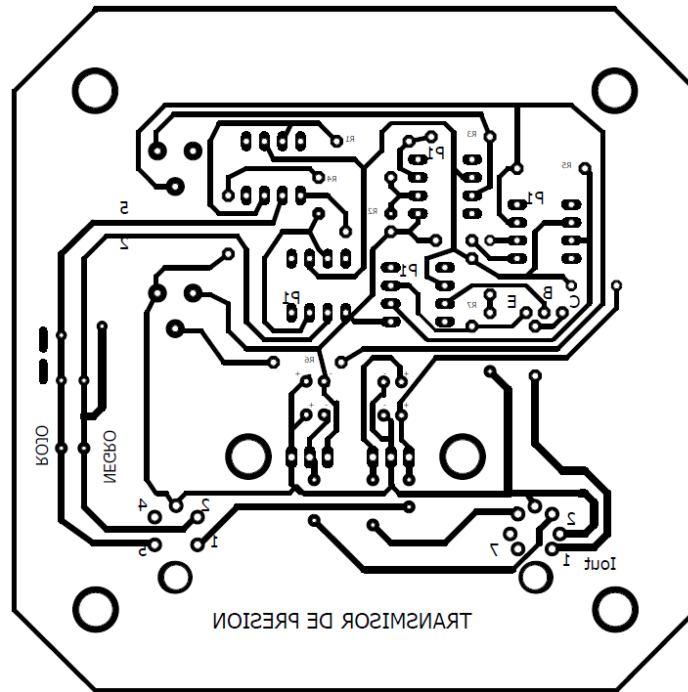
Fuente: Elaboración propia

Estas medidas tomadas para el circuito impreso son las que permitirían el reemplazo o diseño de nuevas tarjetas necesarias para estos módulos ya que a pesar que existen y son funcionales muchas tarjetas tales como Display y demás transmisores para las demás plantas de la marca Feedback, es necesario la elaboración de las mismas ya que están dañadas gran parte de ellas y se está aprovechado que originalmente eran varios los display indicadores de corriente que venían con las plantas sin embargo, actualmente son pocos los que están en funcionamiento de tal manera que si se desean realizar prácticas en simultánea con las plantas de nivel, temperatura y presión no alcanzan los transmisores ni display para dicho funcionamiento.

De esta manera el lograr unas medidas adecuadas se garantiza que sobre este mismo diseño se pueda elaborar a mediano plazo el diseño de nuevos circuitos que reemplazarán a los que se han dañado y que son necesarios para el funcionamiento en simultaneidad de las plantas marca Feedback.

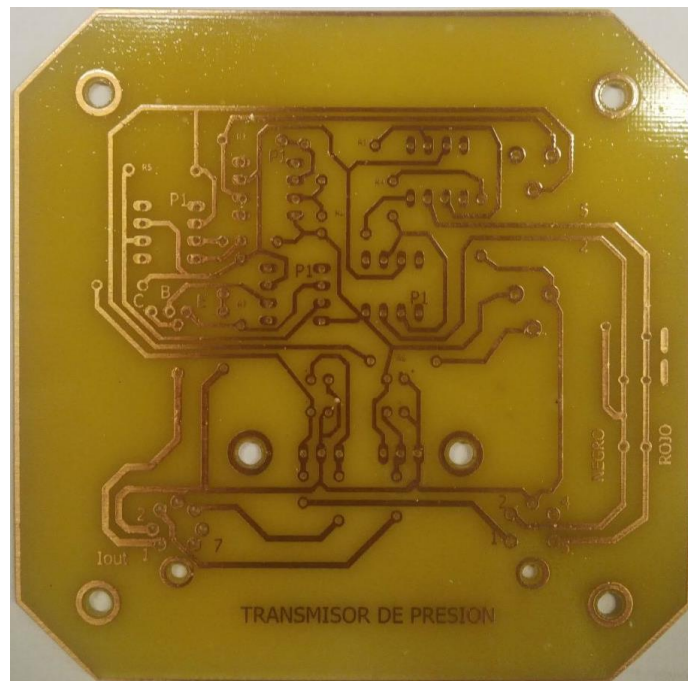
El diseño inicial del circuito impreso del transmisor se muestra en la Figura 22 lográndose una tarjeta muy similar a la que venía con la planta original. Este diseño fue enviado para su elaboración en una baquelita de prueba lográndose el resultado que se muestra en la Figura 23.

Figura 22. Diseño del circuito impreso



Fuente: Elaboración propia

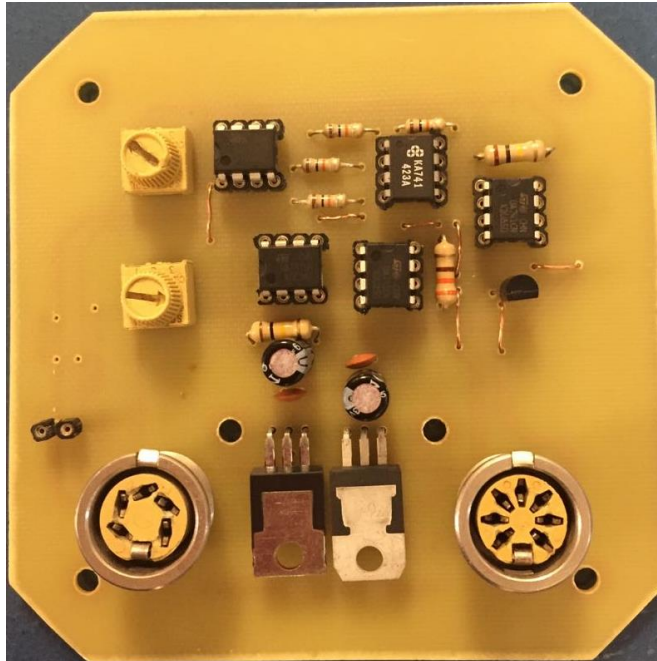
Figura 23. Circuito impreso



Fuente: Elaboración propia

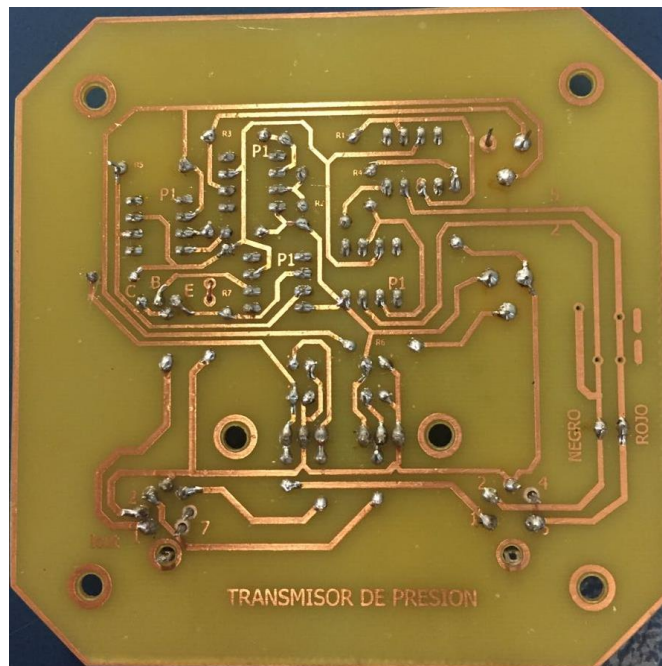
En la Figura 24 y Figura 25 se muestra el circuito impreso del transmisor con sus componentes.

Figura 24. Circuito impreso con sus componentes soldados



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Circuito impreso por su cara de soldadura

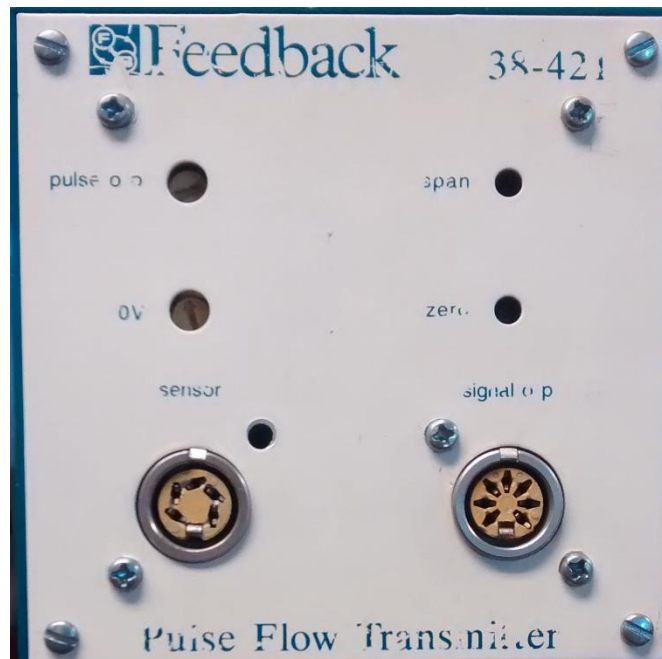


Fuente: Elaboración propia



Este diseño inicial fue llevado a su montaje en la caja del transmisor encontrando el inconveniente que los potenciómetros correspondientes a SPAN y ZERO fueron ubicados equivocadamente en la parte izquierda. Fue necesario utilizar una caratula diferente a la mostrada en la Figura 20 es decir, no se utilizó la caratula original del transmisor de presión para realizar las pruebas. En la Figura 26 se muestra la tarjeta que ya no sería definitiva, corresponde entonces a la tarjeta de pruebas, ya que se evidencia la necesidad entre otras cosas de modificar físicamente la ubicación de los potenciómetros y así utilizar la caratula original correspondiente. Todos los datos fueron tomados usando el transmisor de prueba, basados en el diseño propuesto encontrándose respuesta esperada en términos de corriente del transmisor diseñado.

*Figura 26. Carátula de transmisor de prueba.*



Fuente: Elaboración propia

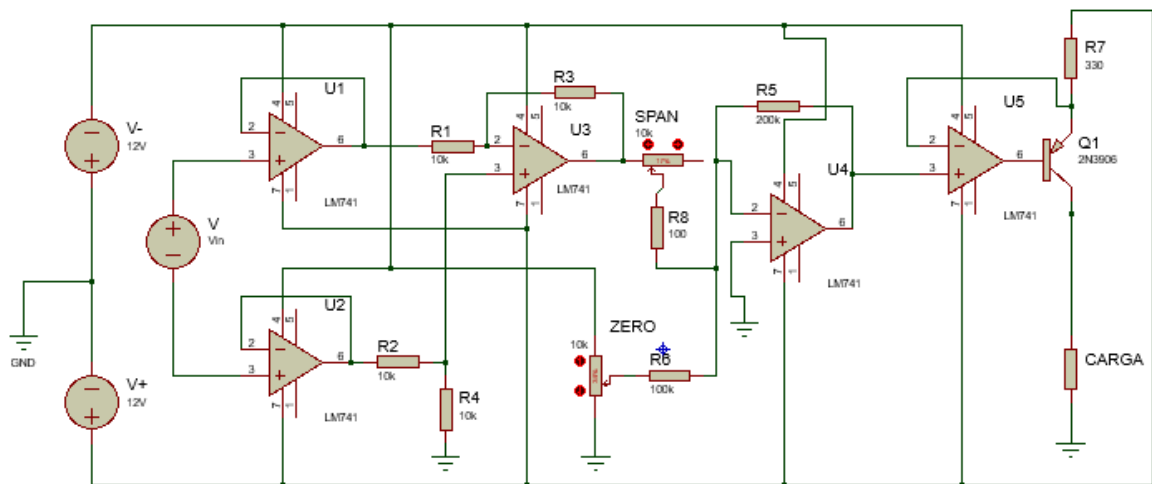
## **2.4 REDISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL Y DEL CIRCUITO IMPRESO**

Con el transmisor de prueba funcional, se realizaron los primeros experimentos y medidas para los dos sensores del módulo de presión. Se verificó el correcto funcionamiento del circuito acondicionador de señal lográndose tener un correcto manejo para el protocolo industrial de 4 a 20mA para diferentes valores de SPAN: 20, 25 y 30 psi, teniendo en cuenta que el diseño se realizó para un SPAN de 30 psi. Sin embargo, cuando se deseaba un SPAN de 10 PSI el valor del potenciómetro correspondiente debía tomar un valor extremo mínimo, razón por la cual se evidenció la necesidad de cambiar el valor de la resistencia de realimentación R5

en el circuito acondicionador de señal por un valor que corresponde al doble del originalmente diseñado. Ello debido a que en el diseño original el valor máximo en el potenciómetro SPAN sería cercano a 3 K $\Omega$  y en la realidad se implementó un potenciómetro con valor de 10 K $\Omega$ . Además, cuando se requería un valor extremo mínimo en el potenciómetro del circuito original no tenía una resistencia en serie que protegiera circuitalmente el llevar este punto a cero voltios. Por esta razón además de requerir para el nuevo diseño un valor de R5 de 200 K $\Omega$ , se adicionó una resistencia R8 para la protección del circuito ante la posibilidad que el potenciómetro SPAN al ser manipulado, se llevara a un extremo mínimo cercano a 0  $\Omega$ .

En la Figura 27 se muestra el diseño para el acondicionador de señal definitivo el cual serviría también para el transmisor diferencial de presión. Según las pruebas realizadas la única diferencia entre uno y otro es que el transmisor de presión diferencial maneja un SPAN entre un valor de 5 a 20 psi mientras que el SPAN manejado por el transmisor de presión es de 10 a 30 psi. En la misma Figura 27 se observa la nueva resistencia de protección R8 y los nuevos valores de la resistencia de realimentación R5 y del potenciómetro SPAN.

*Figura 27. Circuito acondicionador de señal final*



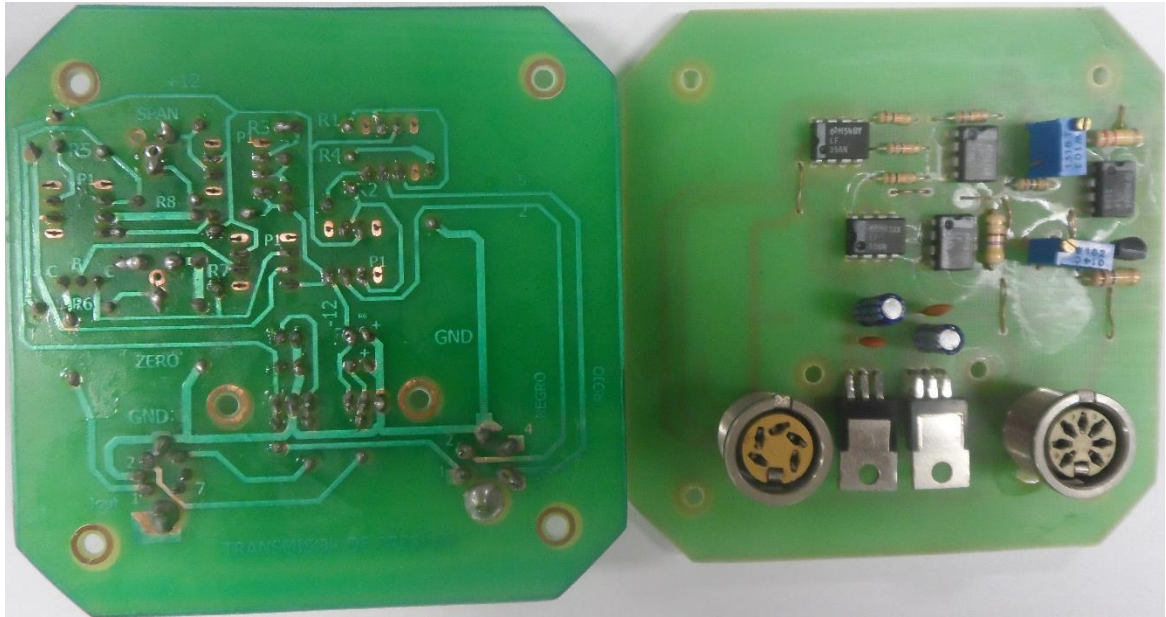
Fuente: Elaboración propia

La Figura 28 muestra el diseño en Eagle definitivo del circuito acondicionador de señal que contiene las modificaciones anteriormente mencionadas es decir, la nueva ubicación de los potenciómetros SPAN y ZERO que es opuesta a la del diseño original. También se dispuso el espacio para la ubicación de la nueva resistencia de protección R8. En el espacio destinado a los potenciómetros SPAN y ZERO se dispuso la posibilidad de ubicar potenciómetros comerciales ya que los potenciómetros originales fueron destinados a la tarjeta de prueba y ellos no son fáciles de adquirir en el mercado.



En la Figura 30 se presentan los circuitos impresos soldados con los componentes definitivos uno con su cara frontal y otro visto desde su capa de soldadura.

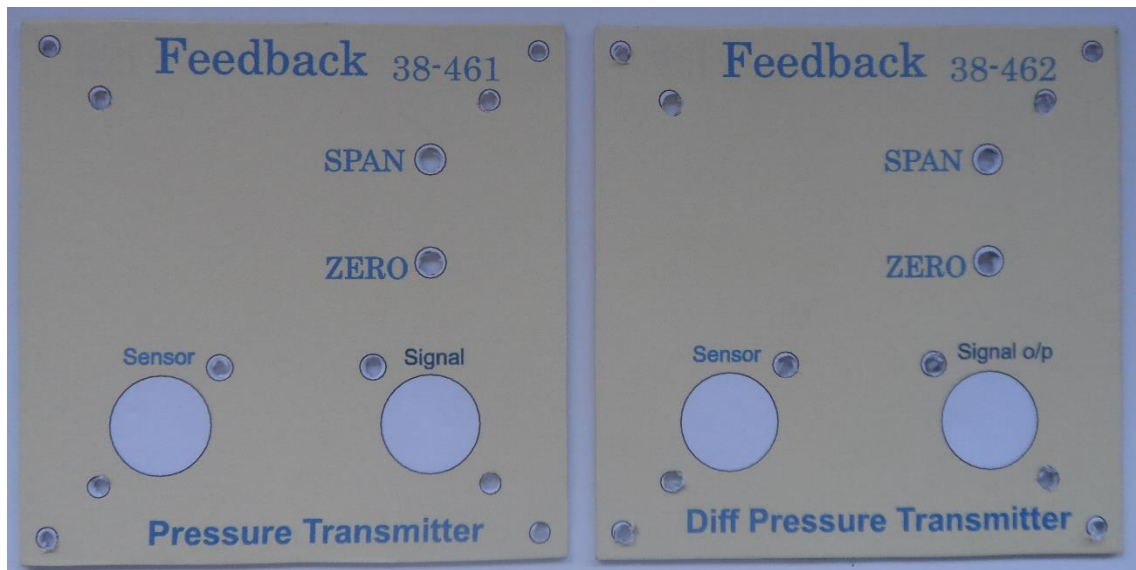
*Figura 30. Circuito impreso definitivo con componentes*



Fuente: Elaboración propia

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diseño de las carátulas frontales que se elaboraron en papel y fue adherido a la carátula ya que en la carátula original (Figura 20) no se notaba su texto.

*Figura 31. Carátulas finales de los transmisores*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32 se muestran los transmisores finales logrados los cuales, podrán ser usados indistintamente ya que su manejo solo depende de las perillas SPAN y ZERO para los rangos de presión manejados.

*Figura 32. Transmisores de presión finales*



Fuente: Elaboración propia

Estos transmisores mostrados conservan las cajas plásticas originales, las caratulas metálicas, además de los conectores DIN. La manipulación de estos transmisores como sucede con cualquier equipo tiene su riesgo de daño sin embargo, para este diseño los dos transmisores cumplen la misma labor pudiéndose tener una de ellos para uso y el otro de respaldo, cuando solo se requiera uno de ellos. En la figura 33 se aprecia el diseño definitivo de los transmisores desarrollados en el proyecto.

*Figura 33. Montaje Final*



Fuente: Elaboración propia

### **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Luego del funcionamiento total de la planta se han realizado laboratorios con estudiantes de las asignaturas Sistemas de Control I y Fundamentos de Automatización de los programas de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Industrial respectivamente, poniendo también a prueba las guías desarrolladas y se ha recibido de buen agrado por parte de los estudiantes el desarrollo de estas prácticas ya que se les ha permitido trabajar con una planta que tiene una respuesta rápida en su dinámica y permite en una sola sesión realizar muchas pruebas de funcionamiento de las diferentes configuraciones de controles propuestos ya que su tiempo de establecimiento es inmediato y su manera didáctica de trabajo permite tomar de forma adecuada y visual los detalles necesarios para el análisis de la respuesta del sistema ante las diferentes perturbaciones que el módulo posee.

#### **4. CONCLUSIONES**

Se realizó la adecuación y mantenimiento de los elementos que conforman el módulo de presión Procon 38-714 de la marca Feedback, sus instrumentos de medida y sus elementos de control electrónico.

Se realizó la caracterización de los sensores de presión SDX15D4 empleando mediciones directas en voltaje.

Se diseñó el circuito acondicionamiento de señal para salida en corriente que conformó el circuito impreso para el transmisor de corriente 4-20mA de los sensores de presión SDX.

Se rediseñaron las prácticas de laboratorio para ser empleadas en la planta de presión como un elemento importante del Laboratorio de Control de Procesos, implementándose control en lazo abierto, control on-off y la implementación de controladores PID.

Mediante el desarrollo de la tesis se logró dar en funcionamiento total la planta de presión para ser empleada en las prácticas de laboratorio de las asignaturas Sistemas de Control I de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Fundamentos de Automatización de la Facultad de Ingeniería Industrial.

## 5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda usar el diseño inicial del circuito impreso aprovechando sus medidas para elaborar los circuitos impresos que se han venido dañando tales como display de corriente y otros transmisores para dar así en servicio prácticas simultáneas en las tres plantas Feedback del laboratorio de Control de Procesos.

Se recomienda la caracterización o modelamiento matemático de la planta para lograr implementar controladores clásicos PID basado en el modelo matemático obtenido.

Se plantea que las perturbaciones que en la planta actual son manuales, también puedan ser realizadas de manera automática mediante la adecuación de válvulas solenoides que puedan garantizar la activación de dichas perturbaciones a voluntad.

El desarrollo de las prácticas de control automático basados en un sistema SISO abre la posibilidad de desarrollos futuros de sistemas MIMO, para lo cual sería necesario una adecuación de la planta y lograr este objetivo empleando para ello sistemas abiertos tales como Matlab.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. A. Española, «Diccionario de la Real Academia Española,» [En línea]. Available: <http://www.rae.es/>. [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [2] G. H. Jaraba Gulfo y G. I. 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, Bucaramanga: Tesis UPB, 2010.
- [3] R. D. Pimienta Barros y Q. M. Rodríguez, Diseño de un módulo de ensayo para la medición de la variable presión, con la implementación de un circuito básico de presión relativa para el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga: Tesis UPB, 2013.
- [4] A. B. Picado y M. Álvarez, Química I, 2a EDICION, editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia EUNED, 2008.
- [5] Equipo de redacción, revista educativa +tiposde, «+tiposde,» [En línea]. Available: <http://www.mastiposde.com/presion.html>. [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [6] C. Jalloul, «Bloginstrumentación,» [En línea]. Available: <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2010/12/20/como-se-mide-la-presion-diferencial/>. [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [7] G. Kwaii, «Instrumentación y control,» 12 Julio 2011. [En línea]. Available: <http://planespecifico.blogspot.com.co/2011/07/instrumentos-para-medicion-de-presion.html>. [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [8] A. Creus Solé, Instrumentación Industrial, 8ra Edición, Ciudad de México: Alfaomega, 2010.
- [9] I. Fundación Wikimedia, «Wikipedia,» 23 Abril 2016. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo\\_HART](https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_HART). [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [10] «Protocolo hart,» [En línea]. Available: [http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol\\_benefits.html](http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_benefits.html). [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [11] «METROLOGIA CONCEPTOS,» [En línea]. Available: <http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/>. [Último acceso: 23 NOVIEMBRE 2017].

- [12] «metrologia legal,» [En línea]. Available: <http://www.lacomet.go.cr/index.php/que-es-metrologia-legal>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [13] «tipos de metrología,» [En línea]. Available: <https://electromagnetismo2012a.wikispaces.com/file/view/Articulo+Metrologia+Industrial.pdf>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [14] «vocabulario de metrologia,» [En línea]. Available: <http://www.inm.gov.co/images/contenidos/SERVICIO-AL-CIUDADANO/INFO-PARA-EL-CIUDADANO/vocabulario.pdf>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [15] A. F. Herrera Sanchez y T. J. Quintero Herrera, «Diseño de un banco para la medición de temperatura en el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana,» Tesis UPB, Bucaramanga, 2016.
- [16] «manometro de piston marca fluke,» [En línea]. Available: [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](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). [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [17] SenSym. [En línea]. Available: [https://www.google.com.co/search?biw=1600&bih=745&tbm=isch&sa=1&q=series+SDX+SenSym&oq=series+SDX+SenSym&gs\\_l=img.3...2901.2901.0.3369.1.1.0.0.0.0.92.92.1.1.0....0...1c.1.64.img..0.0.0.Cxmd3RZFgj8#imgcr=htKWdzLZ\\_jrdRM:](https://www.google.com.co/search?biw=1600&bih=745&tbm=isch&sa=1&q=series+SDX+SenSym&oq=series+SDX+SenSym&gs_l=img.3...2901.2901.0.3369.1.1.0.0.0.0.92.92.1.1.0....0...1c.1.64.img..0.0.0.Cxmd3RZFgj8#imgcr=htKWdzLZ_jrdRM:)
- [18] «protocolo hart,» [En línea]. Available: [http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol\\_how.html](http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html). [Último acceso: 24 noviembre 2017].
- [19] «especificaciones del protocolo hart,» [En línea]. Available: [http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol\\_specs.html](http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_specs.html). [Último acceso: 24 noviembre 2017].
- [20] «ESTUDIO SOBRE INTEGRACIÓN DE REDES DE INSTRUMENTACIÓN DIGITALES EN SISTEMAS DE CONTROL PARA EL MEJORAMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES,» [En línea]. Available: <http://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/328/RianoDiana2010.pdf.txt;jsessionid=30DE89886206B82CAF2FB5DA49B2D5A9?sequence=7>. [Último acceso: 24 noviembre 2017].

## **ANEXO**

GUÍAS DE LABORATORIO  
Módulo de presión y flujo para  
Laboratorio Control de Procesos