

**CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA PLANTA PARA EL CONTROL DE  
PROCESOS INDUSTRIALES, COMO APOYO EN LAS PRÁCTICAS DEL ÁREA DE  
CONTROL DE LA LICENCIATURA EN ELECTRÓNICA.**

TRABAJO DE GRADO  
PARA OPTAR EL TITULO DE PREGRADO EN  
LICENCIADO EN ELECTRÓNICA

PRESENTA  
CHRISTIAN ALEJANDRO BASTIDAS MEDINA  
WILLIAM ELÍAS MEDINA RUIZ

DIRECTOR  
JULIO BONILLA CAMELO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2017

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DEL DIRECTOR**

---

**JURADO 1**

---

**JURADO 2**

**Palabras clave:** Instrumentación, Linealización, control, sensores, motores, hidráulica, acondicionamiento, señales, diseño, construcción, modelado, presión, caudal, temperatura, nivel, programación, automatización, medición, adquisición, sistemas, válvulas, actuadores, tanques y electrónica.

## DEDICATORIA

*La familia es quien se encarga primeramente de educar al individuo, por eso hago especial reconocimiento y dedicación por la obtención de mi título a mis padres Alejandro y Nancy, quienes se encargaron de apoyarme y aconsejarme en cualquier instante de mi vida afectiva y académica. A mi hermano Milton Bastidas por guiarme y brindar la posibilidad de seguir su ejemplo como investigador y educador. A mi pareja Evelyn Osorio por su cariño, paciencia y apoyo incondicional el cual me ha brindado en esta trascendental etapa de mi carrera universitaria, A mi gran amigo Rocky por su humildad y lealtad, no hay duda alguna que jamás olvidaré todos los momentos compartidos y vividos. No cabe duda que sin ustedes, nada de esto se hubiera logrado.*

CHRISTIAN B.

*Este proyecto se lo dedico a mis Papás, por su paciencia y apoyo incondicional.*

*A la colaboración y ayuda por parte de mi pareja. Gracias Yesica Zarate.*

*A la Universidad Pedagógica Nacional, la educadora de educadores, por haberme  
dado el privilegio de estudiar en su plantel educativo.*

*“Porque en Colombia podemos ser mejores personas, si nos preocupamos más por la educación  
de nuestros jóvenes, para tener mayor conciencia de clase y un mejor futuro donde prevalezca la  
equidad y la justicia”*

**WILLIAM M.**


## **AGRADECIMIENTOS**

El cumplimiento del presente trabajo de grado fue posible en gran medida, por la ayuda, tiempo, experiencia, sencillez y amabilidad del profesor Augusto Guarín, docente muy respetado y admirado por el cuerpo estudiantil, que en los momentos de perplejidad del desarrollo del presente, aconsejó, dio perspectivas y sin titubear, nos colaboró a pesar de su agenda tan apretada; en verdad que es un gran maestro, se preocupa la formación de sus estudiantes y no duda en enseñar, es un modelo de maestro a seguir.

Al señor Wilmar del taller de la licenciatura en diseño tecnológico, que nos ofreció perspectivas diferentes y desde su pericia en el área de metalurgia nos evitó un gasto exorbitante de recursos, incluso se ofreció sin ninguna condición para ayudar.

Poseer elementos para el aprendizaje de los conocimientos inherentes de electrónica es imperativo, pero por cuestiones de dinero, muchas veces es imposible adquirir todo el material, por lo que es menester agradecerle a la Licenciatura en Electrónica y en especial, a William Suarez, encargado del laboratorio de electrónica, por habernos hecho el préstamo de la tarjeta de adquisición de datos de la “national instruments” y haber confiado en nosotros, sin su apoyo y colaboración no hubiera sido posible avanzar en la construcción de la presente planta prototipo.


Muchas gracias.

|   |   |  |
|---|---|--|
| <br>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL<br><small>Escuela de Pedagogía</small> | <b>FORMATO</b>                              |  |
|   | <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b> |  |
| <b>Código: FOR020GIB</b>  | <b>Versión: 01</b>                          |  |
| <b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>  | <b>Página 1 de 5</b>                        |  |

| <b>1. Información General</b> |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Tipo de documento</b>      | Trabajo de grado   |
| <b>Acceso al documento</b>    | Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central  |
| <b>Título del documento</b>   | Construcción del prototipo de una planta para el control de procesos industriales, como apoyo en las prácticas del área de control de la licenciatura en electrónica.  |
| <b>Autor(es)</b>              | Bastidas Medina, Christian Alejandro; Medina Ruíz, William Elías   |
| <b>Director</b>               | Julio Bonilla Camelo   |
| <b>Publicación</b>            | Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2017. 197 p.  |
| <b>Unidad Patrocinante</b>    | Universidad Pedagógica Nacional.   |
| <b>Palabras Claves</b>        | INSTRUMENTACIÓN, LINEALIZACIÓN, CONTROL, SENSORES, MOTORES, HIDRÁULICA, ACONDICIONAMIENTO, SEÑALES, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, MODELADO, PRESIÓN, CAUDAL, TEMPERATURA, NIVEL, PROGRAMACIÓN, AUTOMATIZACIÓN, MEDICIÓN, ADQUISICIÓN, SISTEMAS, VÁLVULAS, ACTUADORES, TANQUES Y ELECTRÓNICA. |

| <b>2. Descripción</b>   |
|---|
| <p>Trabajo de grado donde los autores muestran el proceso de construcción de una planta prototipo para el control de las variables fundamentales (presión nivel, caudal y temperatura), de tal manera que se requiera el diseño del sistema hidráulico y posterior implementación de sensores y actuadores para así controlarlo por medio de señales de voltaje (linealmente).</p> <p>Para la construcción del prototipo, se diseña la estructura de tal manera que se acople a exigencias de peso, altura y seguridad industrial. A su vez, emplea técnicas de programación y adquisición de señales tanto por software como por hardware para obtener los objetivos propuestos.</p> |

| <b>3. Fuentes</b>   |
|---|
| <p>Ø María Rosa Espot. (2006). LA AUTORIDAD DEL PROFESOR, que es la autoridad y cómo se adquiere. Madrid: MONOGRAFÍAS ESCUELA ESPAÑOLA.</p> <p>Ø Departamento de tecnología. Licenciatura en Electrónica. (2013). Documento del área de Sistemas de Control. 2013, de UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA. Recuperado de: <a href="http://www.hudamasa.com/PCLE/Materias/Programa/doc_area/control.pdf">http://www.hudamasa.com/PCLE/Materias/Programa/doc_area/control.pdf</a></p> <p>Ø Antonio Creus Solé. (2010). INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL. México D.F.: Alfaomega.</p> <p>Ø José Acedo Sánchez. (2006). INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS. España: Díaz de Santos.</p> <p>Ø María, Moreira, B., M, Jovel, O., R, Jiménez, C., &amp; V, Moncada, B. (2009). Diseño e implementación de</p> |

|  |   |  |
|--|---|--|
| <br>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL<br><i>Escuela de Profesores</i> | <b>FORMATO</b>                              |  |
|  | <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b> |  |
| <b>Código: FOR020GIB</b>   | <b>Versión: 01</b>                          |  |
| <b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>   | <b>Página 2 de 5</b>                        |  |

medios de laboratorio para contribuir al proceso de enseñanza aprendizaje en el área de Instrumentación Industrial. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua Nicaragua. Nexo, 21, 8. 15 de Octubre de 2015, De Dialnet Base de datos.

Ø Ramírez, L., & Londoño, M. (2007). Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal del agua. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín Colombia.

Ø Cristancho, Jean, R. (2009). Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando MATLAB para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura de control. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá Colombia.

Ø Alí, Carrillo., & Moy, Hau. (2009). Modelo didáctico para el aprendizaje significativo en los sistemas automáticos de control. Universidad Rafael Bellosó Chacín, Maracaibo Venezuela.

Ø Gil, Óscar, F., & Robayo, David. (2011). Diseño, construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia.

Ø Paez, Óscar, R. (s.f). Norma ISA. Universidad de Santiago de Chile, Santiago Chile.

Ø NAVARRETE, N. (2003). Atlas básico de tecnología. Barcelona: Parramón.

Lajara, J., & Pelegry, J. (2011). LabVIEW: Entorno gráfico de programación. Barcelona: MARCOMBO.

Ø OGATA, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson.

Ø Escolano, F., Cazorla, M., Alfonso, M., Colomina, O., Lozano, M.. (2003). Inteligencia Artificial Modelos, Técnicas y Áreas de Aplicación. . Madrid: THOMSON.

Ø A. Canut, F. J. Guerra, B. Guzmán, A. Struck. (2008). Número de Reynolds. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México.

Ø Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2017). Pressure. [online] Available at: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html> [Accessed 9 Jun. 2017].

Ø Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2017). Presión en fluido estático. [online] Available at: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pflu.html> [Accessed 29 Jun. 2017].


Ø Definista (2017). ¿Qué es Ley de Vasos Comunicantes? - Su Definición, Concepto y Significado. [online] ConceptoDefinicion.de. Available at: <http://conceptoDefinicion.de/ley-de-vasos-comunicantes/> [Accessed 13 Jun. 2017].

Ø <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>

Ø Instrumentación básica de procesos industriales. (2007). [ebook] M. en C. Armando Morales Sánchez, p.722. Available at: <https://es.scribd.com/doc/6851050/Curso-ISA-Presentation-Instrumentacion-Basica> [Accessed 29 Jun. 2017].

Ø Mavainsa.com (2017). Control de procesos.[ebook] Mavainsa, S.L, p.1. Available at: [http://www.mavainsa.com/documentos/9\\_control\\_procesos.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/9_control_procesos.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø ocwus.us.es (2017). Régimen laminar y turbulento.[online]. Available at: <http://ocwus.us.es/ingenieria->

|  |   |
|--|---|
| <br>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA<br>NACIONAL<br><small>Escuela de Pedagogía</small> | <b>FORMATO</b>                              |
|  | <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b> |
| <b>Código: FOR020GIB</b>   | <b>Versión: 01</b>                          |
| <b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>   | <b>Página 3 de 5</b>                        |

agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%201.Principios%20de%20Hidraulica/tutorial\_05.htm [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø fluidos.eia.edu.co (2017). Clasificación del flujo como laminar o turbulento.[online]. Available at: [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar\\_turbulento.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm) [Accessed 20 Jul. 2017].

Ø chips.mecatronium.com (2017). Tutorial Sensor De Flujo Yf-S201.[online]. Available at: <http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/> [Accessed 20 Jul. 2017].

Ø savinobarbera.com (2017). Teoría de las bombas (bomba) centrífuga. [online]. Available at: <http://www.savinobarbera.com/espanol/teoria.html> [Accessed 19 Jul 2017].

Ø Mavainsa.com (2017). Bombas.[ebook] Mavainsa, S.L, p.6. Available at: [http://www.mavainsa.com/documentos/6\\_bombas.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/6_bombas.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø Atmel.com (2017). Overview ATmega328P (Block Diagram).[datasheet] Atmel, p.6. Available at: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø electgpl.com (2017). El ATmega328p[online]. Available at: <https://electgpl.blogspot.com.co/2016/06/el-atmega328p.html>[Accessed 24 Jul. 2017].

Ø Aristizábal, D., Ramírez, C. and Retrepo, R. (2010). Taller Experimental Linealización. [ebook] Medellín: Universidad Nacional de Colombia, p.9. Available at: <https://aarrietaj.files.wordpress.com/2012/02/linealizacion.pdf> [Accessed 3 Apr. 2017].


Ø Pumpfundamentals.com. (2017). Formulas (Imperial units). [online] Available at: <http://www.pumpfundamentals.com/formula%20grab-bag.htm> [Accessed 1 Aug. 2017].

#### 4. Contenidos

Los componentes temáticos desarrollados en el trabajo de grado son los siguientes:

- En el capítulo de introducción se mencionan los elementos concernientes al planteamiento del problema, justificación y objetivos relacionados con el trabajo de grado.
- En el capítulo de Marco teórico se esbozan los elementos teóricos primordiales a tener en cuenta en el trabajo de grado, además los antecedentes que fueron importantes para el desarrollo del mismo.
- El apartado de Metodología se evidencia un prelude sobre el funcionamiento de cada elemento y los aspectos que se tuvieron en cuenta para la construcción del prototipo.
- En el capítulo de Construcción se describe el proceso de funcionamiento y posterior calibración de los sensores presentes en el prototipo.
- En el apartado de pruebas y resultados se describe el proceso de adquisición de señales por medio de la versión de prueba del software LabVIEW y las curvas de funcionamiento de los sensores.
- Por último, en conclusiones y recomendaciones se mencionan los niveles de logro para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el trabajo de grado, junto con las recomendaciones y proyecciones del mismo.



|   |   |  |
|---|---|--|
| <br>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA<br>NACIONAL<br><small>Escuela de Ingeniería</small> | <b>FORMATO</b>                              |  |
|   | <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b> |  |
| <b>Código: FOR020GIB</b>  | <b>Versión: 01</b>                          |  |
| <b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>  | <b>Página 4 de 5</b>                        |  |

Respecto al trabajo de grado desarrolla los siguientes objetivos:

- **Objetivo general**

Construir el prototipo de una planta de procesos industriales para el control de las variables fundamentales, como apoyo a las prácticas del área de control.

- **Objetivos específicos**

- Definir el esquema del sistema hidráulico de la planta que se ajuste a las exigencias de diseño: movilidad, peso, durabilidad, dimensiones, seguridad industrial y que instrumente las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura).

- Seleccionar los componentes que cumplan con los requerimientos de diseño para ensamblar la planta, tal como válvulas con respuesta lineal, tanques, sensores y electrobomba.

- Examinar el funcionamiento de la planta, por medio de un laboratorio de control de prueba, en el cual incluya las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura) y todos los actuadores presentes en la planta (válvulas, electrobomba, etc.).


## 5. Metodología

Los elementos del sistema se deben ajustar al modelo matemático inherente a la planta prototipo, para lo cual se hace necesario realizar la linealización de cada componente, en especial de las válvulas. Se hacen mediciones, se obtienen resultados y se aplica un procedimiento que garantice un trabajo lineal en todo el sistema. Los sensores de presión se usan para medir el nivel del líquido en cada uno de los recipientes y así sensar la presión a la salida de la bomba. El caudal del sistema, se obtiene añadiendo un sensor de efecto hall, que enviara pulsos PWM, cuya frecuencia se verá alterada por variaciones en el grado de apertura de la válvula numero 1. La temperatura es sensada en el tanque principal, y su respuesta se emite por PWM. El resultado que emite cada sensor, requiere de un proceso de filtrado y amplificación, dichos valores se observan como voltajes siendo 0 voltios el valor mínimo y 10 voltios el valor máximo obtenido. Además se hace necesario diseñar un conversor digital analógico, pues la respuesta emitida por el Microcontrolador es digital y para el presente proyecto, las variables eléctricas deben ser analógicas. Se debe adquirir una electrobomba que ofrezca la presión necesaria para poder llevar el líquido a los recipientes y por consiguiente, realizar un control de nivel usando para ello la interfaz del software LabVIEW (versión de prueba). Referente a la estructura fue diseñada en software especializado.

## 6. Conclusiones

Del proceso de construcción del prototipo de una planta para el control de procesos industriales y el desarrollo de los objetivos del presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El desarrollo del objetivo número 1 se alcanzó exitosamente debido a que se definió y diseñó el esquema de la planta teniendo en cuenta los factores de movilidad y durabilidad.
- La selección de componentes cumplió con los requerimientos de diseño para el ensamblaje de la planta: haciendo énfasis en la linealidad de los componentes (válvulas reguladoras). Accesorios como tuberías, acoples y mangueras cumplieron con todos sus propósitos, su adecuada instalación permite que se eviten futuras fugas y deterioro por su uso. Además cada elemento es de fácil adquisición. El objetivo número 2 fue cumplido satisfactoriamente.
- Se cumplió óptimamente el objetivo referente al funcionamiento de la planta con ayuda del software de instrumentación virtual LabVIEW (versión de prueba) y la tarjeta de adquisición de datos, para posteriormente relacionar su funcionalidad por medio de una guía de laboratorio en la

|  |   |  |
|--|---|--|
| <br>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA<br>NACIONAL<br><i>Formando al futuro</i> | <b>FORMATO</b>                              |  |
|  | <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b> |  |
| <b>Código: FOR020GIB</b>   | <b>Versión: 01</b>                          |  |
| <b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>   | <b>Página 5 de 5</b>                        |  |

cual posibilita al usuario trabajar con los componentes de la planta y así obtener provecho del sistema hidráulico.

- La fase de pruebas y experimentación con el software LabVIEW demostró que se pueden instrumentar las variables fundamentales que hay en la planta, y con ayuda del mismo, los actuadores respondieron a los requerimientos planteados.

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Elaborado por:</b> | Bastidas Medina, Christian Alejandro; Medina Ruíz William Elías |
| <b>Revisado por:</b>  | Julio Bonilla Camelo  |

|  |    |    |      |
|--|----|----|------|
| <b>Fecha de elaboración del Resumen:</b> | 24 | 08 | 2017 |
|--|----|----|------|

## Tabla de contenido

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Capítulo 1. Introducción.....</b>  | <b>1</b>     |
| <b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>   | <b>2</b>     |
| <b>1.2. Justificación .....</b>   | <b>3</b>     |
| <b>1.3. Objetivos.....</b>  | <b>5</b>     |
| <b>1.3.1. Objetivo general.....</b>   | <b>5</b>     |
| <b>1.3.2. Objetivos específicos.....</b>  | <b>5</b>     |
| <br><b>Capítulo 2. Marco teórico.....</b>   | <br><b>6</b> |
| <b>2.1. Marco conceptual.....</b>   | <b>6</b>     |
| <b>2.1.1. Sistema de control... ..</b>  | <b>6</b>     |
| <b>2.1.2. Control de procesos .....</b>   | <b>7</b>     |
| <b>2.1.3. Tipos de medición.....</b>  | <b>8</b>     |
| <b>2.1.4. Medidas de presión.....</b>   | <b>8</b>     |
| <b>2.1.4.1. Clases de presión....</b>   | <b>9</b>     |
| <b>2.1.4.1.1. Presión absoluta .....</b>  | <b>10</b>    |
| <b>2.1.4.1.2. Presión atmosférica.....</b>  | <b>10</b>    |
| <b>2.1.4.1.3. Presión diferencial.....</b>  | <b>11</b>    |
| <b>2.1.4.1.4. Presión relativa.....</b>   | <b>11</b>    |
| <b>2.1.4.2. Métodos para medir la presión.....</b>  | <b>11</b>    |
| <b>2.1.4.2.1. Medida directa de presión.....</b>  | <b>12</b>    |
| <b>2.1.4.2.1.1. Medida directa de presión con columna de líquido.....</b>                             | <b>12</b>    |
| <b>2.1.4.2.2. Medida indirecta de presión.....</b>  | <b>13</b>    |
| <b>2.1.4.2.2.1. Medida indirecta de presión con instrumentos basados en señales eléctricas.....</b>   | <b>13</b>    |
| <b>2.1.4.3. Presión en los líquidos.....</b>  | <b>15</b>    |
| <b>2.1.4.3.1. Presión hidrostática.....</b>   | <b>15</b>    |
| <b>2.1.5. Medidas de caudal.....</b>  | <b>16</b>    |
| <b>2.1.5.1. Medición de caudal por área variable.....</b>   | <b>18</b>    |
| <b>2.1.5.2. Medición de caudal por desplazamiento positivo .....</b>                                  | <b>19</b>    |
| <b>2.1.5.3. Medidores de caudal másicos.....</b>  | <b>20</b>    |
| <b>2.1.5.3.1. Medidores de volumen con conversión a masa en función de presión y temperatura.....</b> | <b>20</b>    |
| <b>2.1.5.3.2. Medidores directos de caudal en masa.....</b>   | <b>21</b>    |
| <b>2.1.5.4. Medida de caudal por presión diferencial.....</b>   | <b>22</b>    |
| <b>2.1.6. Medidas de nivel.....</b>   | <b>23</b>    |
| <b>2.1.6.1. Medición de nivel en líquidos.....</b>  | <b>24</b>    |
| <b>2.1.6.1.1. Medición de nivel por medio de la presión hidrostática .....</b>                        | <b>26</b>    |
| <b>2.1.7. Medida de temperatura.....</b>  | <b>28</b>    |
| <b>2.1.7.1. Tipos de termómetros.....</b>   | <b>29</b>    |
| <b>2.1.7.2. Termopar.....</b>   | <b>30</b>    |
| <b>2.1.8. Clasificación e identificación de instrumentos.....</b>                                     | <b>31</b>    |
| <b>2.1.8.1. Normatividad ISA.....</b>   | <b>32</b>    |
| <b>2.1.8.1.1. Norma ISA-S5.1-84 (R-1992).....</b>   | <b>33</b>    |
| <b>2.1.9. Exactitud.....</b>  | <b>35</b>    |

|  |    |
|--|----|
| 2.1.10. Precisión.....   | 37 |
| 2.1.11. Zona muerta.....   | 39 |
| 2.1.12. Principio de Bernoulli.....  | 40 |
| 2.1.13. Vasos comunicantes.....  | 40 |
| 2.1.14. Válvulas.....  | 42 |
| 2.1.14.1. Características de control.....  | 42 |
| 2.1.14.2. Clases de válvulas.....  | 43 |
| 2.1.14.2.1. Válvula de control lineal.....   | 43 |
| 2.1.14.2.2. Válvula de control de igual porcentaje.....  | 45 |
| 2.1.14.2.3. Válvula de control de abertura rápida.....   | 46 |
| 2.1.15. Regímenes de flujo de fluidos en tuberías .....  | 46 |
| 2.1.15.1. Flujo o régimen laminar.....   | 47 |
| 2.1.15.2. Flujo o régimen turbulento.....  | 48 |
| 2.1.15.3. Numero de Reynolds.....  | 48 |
| 2.1.16. Modelado de sistemas hidráulicos .....   | 49 |
| 2.1.16.1. Analogía hidráulica.....   | 51 |
| 2.1.17. Bombas hidráulicas.....  | 52 |
| 2.1.17.1. Bomba sumergible.....  | 53 |
| 2.1.17.2. Terminología para la caracterización de una bomba.....   | 54 |
| 2.1.18. Sensores.....  | 55 |
| 2.1.18.1. Sensor de presión.....   | 56 |
| 2.1.18.2. Sensor de temperatura.....   | 57 |
| 2.1.18.3. Sensor de caudal.....  | 59 |
| 2.1.18.3.1. Funcionamiento del sensor YF-S201.....   | 60 |
| 2.1.19. Motores.....   | 62 |
| 2.1.19.1. Motor paso a paso.....   | 63 |
| 2.1.20. Microcontrolador ATmega328p.....   | 64 |
| 2.1.20.1. Aplicación y funcionalidad.....  | 67 |
| 2.1.21. Linealización .....  | 67 |
| 2.1.21.1. Linealización por logaritmos.....  | 68 |
| 2.2. Antecedentes investigativos.....  | 69 |
| 2.2.1. Diseño e implementación de medios de laboratorio para contribuir el proceso de enseñanza aprendizaje en el área de instrumentación industrial.....      | 69 |
| 2.2.2. Modelo didáctico para el aprendizaje significativo en los sistemas automáticos de control.....  | 70 |
| 2.2.3. Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal del agua.....  | 71 |
| 2.2.4. Diseño, construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden.....  | 71 |
| 2.2.5. Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control del acuario del museo de ciencias biológicas de la escuela politécnica nacional..... | 71 |
| Capítulo 3. Metodología.....   | 72 |
| 3.1. Determinación y diseño del sistema hidráulico.....  | 72 |
| 3.1.1. Relación diseño – electrobomba.....   | 72 |
| 3.2. Características y componentes del sistema hidráulico.....   | 73 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3. Estructura.....   | 75        |
| 3.3.1. Dimensiones de la estructura.....   | 75        |
| 3.4. Actuadores.....   | 76        |
| 3.5. Programación.....   | 78        |
| 3.6. Linealización de las válvulas.....  | 80        |
| 3.6.1. Resistencia hidráulica.....   | 81        |
| 3.7. Modelado matemático de la planta.....   | 81        |
| 3.7.1. Análisis en el tanque A.....  | 83        |
| 3.7.2. Análisis en el tanque B.....  | 84        |
| <b>Capítulo 4. Construcción.....</b>   | <b>86</b> |
| 4.1. Bomba.....  | 86        |
| 4.1.1. Calculo número de Reynolds.....   | 87        |
| 4.1.2. Calculo de la presión de la bomba .....   | 89        |
| 4.2. Sensor de caudal.....   | 89        |
| 4.2.1. Calibración.....  | 90        |
| 4.2.2. Modo de operación y código de funcionamiento.....   | 91        |
| 4.3. Sensores de presión .....   | 93        |
| 4.3.1. Sensado nivel del líquido en cada tanque .....  | 93        |
| 4.3.1.1. Calibración para obtener el nivel del líquido.....                                      | 95        |
| 4.3.1.2. Lectura de la señal del sensor de presión MPX5010GP en el<br>Microcontrolador.....      | 95        |
| 4.3.2. Sensado de presión de la salida de la bomba.....  | 98        |
| 4.3.2.1. Diseño de la etapa de amplificación de la señal del sensor de presión<br>MPX2050GP..... | 98        |
| 4.3.2.1.1. Amplificador de instrumentación AD620.....  | 99        |
| 4.3.2.2. Diseño de la etapa.....   | 100       |
| 4.3.2.3. Calibración para obtener la presión de salida de la bomba.....                          | 101       |
| 4.3.2.4. Lectura de la señal del sensor de presión MPX2050GP en el<br>Microcontrolador.....      | 102       |
| 4.3.2.4.1. Recomendaciones al momento de realizar la lectura del<br>sensor.....                  | 103       |
| 4.4. Válvulas.....   | 104       |
| 4.4.1. Obtención valor resistencia hidráulica.....   | 105       |
| 4.4.2. Linealización de las válvulas de regulación.....  | 106       |
| 4.4.3. Programación control de giro válvula motorizada.....                                      | 111       |
| 4.4.3.1. Apreciaciones.....  | 113       |
| 4.5. Conversor digital analógico.....  | 114       |
| 4.6. Temperatura tanque principal.....   | 116       |
| 4.6.1. Resistencia calorífica.....   | 117       |
| 4.6.2. Lectura y procesamiento de la medida de temperatura .....                                 | 118       |
| 4.6.3. Sistema de seguridad de temperatura para la bomba sumergible.....                         | 119       |
| 4.7. Driver A4988 para motores paso a paso .....   | 120       |
| 4.7.1. Características y ventajas del driver A4988.....  | 120       |
| 4.7.2. Precauciones y recomendaciones para su adecuado funcionamiento.....                       | 122       |
| 4.7.3. Configuración y cálculo de la restricción de la corriente.....                            | 122       |

|  |     |
|--|-----|
| 4.8. Circuitos del sistema.....  | 125 |
| 4.8.1. Esquema sensor MPX2050GP.....   | 125 |
| 4.8.2. Esquema sensor MPX5010GP.....   | 125 |
| 4.8.3. Esquema de conexión motor driver.....   | 126 |
| 4.8.4. Sistema de seguridad para la bomba.....   | 127 |
| 4.8.5. Esquema de los Microcontroladores.....  | 129 |
| 4.8.5.1. Movimiento de los motores .....   | 129 |
| 4.8.5.2. Sensores de presión.....  | 129 |
| 4.8.5.3. Sensores de temperatura y caudal .....  | 130 |
| 4.8.6. Conversión digital – analógico.....   | 131 |
| 4.8.7. Reguladores de voltaje.....   | 132 |
| 4.8.8. Fuente de voltaje dual.....   | 133 |
| 4.9. Diseño de circuitos impresos.....   | 135 |
| 4.10. Ubicación de los elementos .....   | 138 |
| 4.11. Estructura final del sistema.....  | 141 |
| <br>   |     |
| Capítulo 5. Pruebas y resultados.....  | 142 |
| 5.1. Software y hardware para la adquisición y procesamiento de las señales.....                   | 142 |
| 5.1.1. Dispositivo para la adquisición de señales acondicionadas.....                              | 142 |
| 5.1.2. Uso de NI LabVIEW 2013.....   | 144 |
| 5.1.2.1. Descripción de las herramientas y elementos que posee<br>LabVIEW.....                     | 145 |
| 5.2. Pruebas y comportamientos de los sensores.....  | 147 |
| 5.2.1. Resultados de las lecturas de los sensores presentes en el sistema.....                     | 147 |
| 5.2.1.1. Resultados de los sensores analógicos.....  | 148 |
| 5.2.2. Tratamiento de las señales empleadas en el sistema de adquisición de<br>datos.....          | 152 |
| 5.2.2.1. Controles numéricos de las variables fundamentales en el panel<br>frontal de LabVIEW..... | 153 |
| 5.2.2.2. Visualización de las señales de los tanques A y B.....                                    | 155 |
| <br>   |     |
| Capítulo 6. Conclusiones, recomendaciones y proyección.....  | 157 |
| 6.1. Conclusiones.....   | 157 |
| 6.2. Recomendaciones.....  | 161 |
| 6.3. Proyecciones.....   | 162 |
| <br>   |     |
| Referencias.....   | 163 |
| Anexos.....  | 167 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Unidades de presión.....  | 9  |
| Figura 2 Tipos de medida de presión.....                                     | 10 |
| Figura 3 Visualización de la medida obtenida con una columna de líquido..... | 13 |
| Figura 4 Célula de medida de presión diferencial.....                        | 14 |
| Figura 5 Presión en fluido estático.....                                     | 16 |
| Figura 6 Principios de medida en caudales .....                              | 17 |
| Figura 7 Rotámetro.....  | 18 |
| Figura 8 Contador tipo rueda oval.....                                       | 19 |
| Figura 9 Medidor de Coriolis.....  | 22 |
| Figura 10 Presión diferencial creada por la placa orificio.....              | 23 |
| Figura 11 Medidores de nivel con flotador.....                               | 26 |
| Figura 12 Medidor manométrico de nivel.....                                  | 27 |
| Figura 13 Termómetro de vidrio.....  | 29 |
| Figura 14 Efectos Peltier y Thomson.....                                     | 31 |
| Figura 15 Tipos de termopares.....   | 31 |
| Figura 16 Normatividad ISA .....   | 32 |
| Figura 17 Códigos de identificación de los instrumentos (ISA-S5.1).....      | 34 |
| Figura 18 Clasificación de la simbología entre conexiones .....              | 35 |
| Figura 19a Definiciones de los instrumentos.....                             | 38 |
| Figura 19b Exactitud y precisión.....  | 39 |
| Figura 20 Principio de Bernoulli.....  | 41 |
| Figura 21 Válvulas de control.....   | 44 |
| Figura 22 Característica inherente de la válvula de control .....            | 44 |
| Figura 23 Característica de la válvula de control-tapón curvado .....        | 45 |
| Figura 24 Flujo o régimen laminar .....                                      | 47 |
| Figura 25 Flujo o régimen turbulento.....                                    | 48 |
| Figura 26 Sistema hidráulico de nivel de líquidos.....                       | 50 |
| Figura 27 Clasificaciones de bombas hidráulicas.....                         | 53 |
| Figura 28 Esquema de sensor.....   | 56 |
| Figura 29 Sensor de presión con encapsulado 867B-04.....                     | 57 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 30 Sensor de temperatura DS18B20 .....  | 58  |
| Figura 31 Sensor de caudal YF-S201.....  | 61  |
| Figura 32 Composición interna del sensor.....  | 61  |
| Figura 33 Giro anti horario de un motor paso a paso.....   | 64  |
| Figura 34a Secuencia de paso entero giro horario (a) y anti horario (b) .....                          | 65  |
| Figura 34b Secuencia de medio paso para giro horario (a) y anti horario (b).....                       | 65  |
| Figura 35 Diagrama en bloques de las funcionalidades del ATmega328P.....                               | 66  |
| Figura 36 Especificaciones del ATmega328P.....   | 67  |
| Figura 37 Configuración de pines.....  | 68  |
| Figura 38 Perfil de la planta hecho en Solidworks.....   | 77  |
| Figura 39 Perfil de la planta hecho en Solidworks.....   | 78  |
| Figura 40 Perfil de la planta hecho en Solidworks.....   | 79  |
| Figura 41 Resistencia hidráulica.....  | 81  |
| Figura 42 Esquema del sistema de control de nivel de líquido.....                                      | 83  |
| Figura 43 Circuito de protección encendido y apagado de la bomba sumergible.....                       | 87  |
| Figura 44 Calibración del sensor de caudal.....  | 91  |
| Figura 45 Configuración de pines del sensor MPX5010GP con encapsulado 867B-04.....                     | 96  |
| Figura 46 Diagrama de bloques del diseño para el acondicionamiento de la señal del sensor MPX2050..... | 99  |
| Figura 47 Amplificador de instrumentación AD620.....   | 99  |
| Figura 48 Especificaciones del sensor MPX2050.....   | 101 |
| Figura 49 Configuración de pines del sensor MPX2050GP con encapsulado 344B-01.....                     | 104 |
| Figura 50 Basic flow test system.....  | 106 |
| Figura 51 Piping requirements standard test section.....   | 107 |
| Figura 52 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 1.....  | 108 |
| Figura 53 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 1 con aproximación polinomial de grado 1.....   | 109 |
| Figura 54 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 2.....  | 109 |
| Figura 55 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 2 con aproximación polinomial de grado 1.....   | 110 |
| Figura 56 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 3.....  | 110 |
| Figura 57 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 3 con aproximación polinomial de grado 1.....   | 111 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 58 Diagrama funcional en bloques del A4988.....   | 121 |
| Figura 59 Diagrama de conexiones del controlador.....  | 123 |
| Figura 60 Esquema eléctrico para el funcionamiento del sensor MPX2050GP.....   | 126 |
| Figura 61 Esquema eléctrico para el funcionamiento del sensor MPX5010GP.....   | 127 |
| Figura 62 Esquema eléctrico para el funcionamiento del motor paso a paso bipolar usando el driver A4988.....           | 128 |
| Figura 63 Esquema del control del giro del motor usando microcontrolador ATmega328P.....                               | 130 |
| Figura 64 Esquema para la adquisición de las variables de presión usando microcontrolador ATmega328P.....              | 131 |
| Figura 65 Esquema para la adquisición de las variables de temperatura y caudal usando microcontrolador ATmega328P..... | 132 |
| Figura 66 Esquema conversor Digital – Analógico usando el Amplificador LM358.....                                      | 133 |
| Figura 67 Esquema regulador de voltaje LM7805.....   | 134 |
| Figura 68 Esquema eléctrico para la fuente de voltaje dual +12V y -12V.....  | 134 |
| Figura 69 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX2050GP hecha en Proteus 8, vista superior.....         | 135 |
| Figura 70 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX2050GP hecha en Proteus 8, vista inferior.....         | 136 |
| Figura 71 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX5010GP hecha en Proteus 8, vista superior.....         | 136 |
| Figura 72 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX5010GP hecha en Proteus 8, vista inferior.....         | 137 |
| Figura 73 Circuito impreso para el funcionamiento de la fuente dual hecha en Proteus 8, vista superior.....            | 137 |
| Figura 74 Circuito impreso para el funcionamiento de la fuente dual hecha en Proteus 8, vista inferior.....            | 138 |
| Figura 75 Vista frontal de la estructura final.....  | 141 |
| Figura 76 Tarjeta de adquisición de datos.....   | 143 |
| Figura 77 Panel frontal LabVIEW 2013.....  | 145 |
| Figura 78 Paleta de controles del panel frontal.....   | 146 |
| Figura 79 Paleta de controles del panel de programación.....   | 147 |
| Figura 80 Captura de medidas de cada sensor por medio del puerto serial.....   | 148 |
| Figura 81 Respuesta de las muestras en voltaje y en presión del tanque A.....  | 150 |
| Figura 82 Respuesta de las muestras en voltaje y altura del tanque A.....  | 150 |
| Figura 83 Respuesta de las muestras en voltaje y en presión del tanque B.....  | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 84 Respuesta de las muestras en voltaje y altura del tanque B.....                                | 151 |
| Figura 85 Rutina de programación para leer señales analógicas en LabVIEW 2013.....                       | 152 |
| Figura 86 Herramientas de visualización de los tanques A y B.....  | 153 |
| Figura 87 Slide de visualización para la señal de presión por parte de la bomba.....                     | 154 |
| Figura 88 Indicador de la señal acondicionada proveniente del sensor de caudal.....                      | 154 |
| Figura 89 Visualizador de la señal acondicionada de temperatura.....                                     | 154 |
| Figura 90 Captura de la señal acondicionada del tanque A.....  | 155 |
| Figura 91 Captura de la señal acondicionada del tanque B.....  | 156 |
| Figura 92 Rutina de programación para la lectura de los sensores presentes en el sistema hidráulico..... | 157 |

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado tiene como finalidad, desarrollar el prototipo de una planta para el control de las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura), con el propósito de contextualizar al estudiante que cursa las asignaturas de los sistemas de control de la Licenciatura en Electrónica, con lo que respecta al mundo de la industria, pues es en este entorno donde la automatización es fundamental para cumplir con la demanda, oferta y calidad del producto.

Si bien es cierto que el perfil del egresado de la Licenciatura en Electrónica está orientado a la enseñanza en tecnología como su rol profesional en la sociedad, no es cauto delimitar el área laboral del futuro egresado para dicho fin, adquirir las competencias, conocimientos y manejo de maquinaria, propenden a tener un buen candidato para laborar en la industria y genera buena percepción en la sociedad.

La planta prototipo requiere de un ajuste acorde al modelo matemático de la misma, siendo necesario realizar procesos de Linealización para las válvulas y mediciones de nivel de líquido en un tanque. Quien opere este puesto de trabajo, podrá ajustar el esquema de control dependiendo del caso, es decir, puede controlar el nivel del líquido de dos tanques dependiendo del nivel deseado, ajustar el caudal que circula por cada uno de los conductos, definir un rango de presión permitido y elevar o disminuir la temperatura del líquido dependiendo del objetivo que cada quien se proponga.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudiante de la licenciatura en electrónica que cursa las asignaturas concernientes al área del control así como el docente que imparte dichas cátedras, actualmente encaran la situación de la carencia de una planta, que posibilite realizar el control de las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura) permitiendo profundizar en los conocimientos inherentes a los sistemas de control. El no poseer dicho material hace que la clase propenda por lo magistral y para una asignatura de tal naturaleza, se requiere de una educación activa, es decir, que el "educando aprende haciendo" (Rosa, 2006). Lo ideal sería, que el estudiante pueda estar contextualizado acorde a la teoría de control ampliando su visión en el modelado de los diferentes sistemas (mecánico, eléctrico e hidráulico), por ende, el uso del prototipo apoyaría en la inmersión del estudiante en el control de procesos, es decir, conocimiento aplicado.

En el área de los sistemas de control, es importante que los equipos posibiliten en el educando la oportunidad de explorar y aplicar la teoría concerniente al control de procesos, con los cuales el estudiante pueda ahondar y entender su fundamento, enfocado en la solución de problemas que en su mayoría están ligados al mundo cotidiano. Con el modelamiento matemático es posible realizar una aproximación de los fenómenos físicos y con ello es factible obtener un comportamiento específico de un sistema de control, de esta forma hacer modificaciones y correcciones correspondientes a un modelo simulado. No obstante, dicho procedimiento tiende a ser ideal, por lo que si no se aplica al mundo real, quedaría reducida a una teoría que no tiene en cuenta las condiciones reales de un sistema de control el cual está sujeto a cambios físicos y comportamientos variables.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de control han impactado a la industria en general, llevando consigo, grandes beneficios o provechos para encarar un problema específico, en un mundo automatizado y muy dinámico. Teniendo en cuenta dicha importancia, es trascendental que para una carrera universitaria que tiene asignaturas ligadas a los sistemas de control, exista un elemento el cual ofrezca oportunidades para explorar y aplicar dichos conocimientos inherentes a este campo, ya que, “La Licenciatura en Electrónica tiene un impacto en el sector educativo y en el sector productivo, espacios donde la formación disciplinar específica, califica al egresado para desempeñarse en el diseño e implementación de proyectos donde se involucre transformación del entorno y la comunidad cognoscente.” (DTE, Electrónica 2013), por tanto, se hace pertinente contextualizar y fundamentar a los estudiantes sobre dichos procesos y sistemas.

Las asignaturas concernientes a los sistemas de control, tienen como objetivo proporcionar al estudiante los conocimientos, terminologías y técnicas, para el control de variables o procesos; poseer una planta prototipo para la aplicación de dichas temáticas aumentaría, las habilidades del dominio frente al tema. La teoría de control ha jugado un papel importante en el avance de la ingeniería y de la ciencia, por ello, el estudiante de la licenciatura en electrónica, debería tener a su alcance las herramientas que le permitan comprender y desarrollar las técnicas de control durante los talleres propuestos en la clase.

Los sistemas de control emplean frecuentemente componentes de diversos tipos, por ejemplo, componentes mecánicos, eléctricos, hidráulicos y combinaciones de estos, tal como lo menciona

el documento del área de sistemas de control de la licenciatura en electrónica; la teoría de control es conocimiento aplicado y por ende la disponibilidad de una planta prototipo para el control se hace imprescindible. El estudiante que realice sus prácticas en una planta prototipo conformada por los elementos mencionados, tendrá una visión más acorde a la realidad con lo que respecta al control de las variables fundamentales y una mejor ambientación con las leyes inherentes a los sistemas de control, así como la satisfacción del objetivo educativo enmarcado en el área de control de la licenciatura en electrónica, “El eje central de los sistemas de control es el del diseño de controladores electrónicos, realizando un análisis de la dinámica de los sistemas, funciones de transferencia, representaciones matemáticas, políticas de control basadas en el tiempo, en la frecuencia y en los sistemas inteligentes, específicamente la lógica difusa. El uso apropiado de cada uno de estos elementos permite el diseño de sistemas de control eficientes.” (DTE, Electrónica 2013).

El estudio del presente tema, puede ser de gran ayuda para establecer lazos de unión entre los diferentes campos de estudio y entre las diferentes operaciones unitarias que definen un proceso productivo. De lo anterior y desde el enfoque de la investigación formativa en investigación y desarrollo (I+D), se hace relevante la creación de un prototipo de una planta que genere beneficios para el estudiante que curse la asignatura de sistemas de control, en aspectos como:

1. El estudiante comenzará a involucrarse en el contexto del control de procesos, conociendo su propósito y le permitirá interactuar directamente con el sistema hidráulico y las variables fundamentales de control (nivel, caudal, presión y temperatura).
2. Podrá realizar el diseño de controlador más apropiado, concerniente a la adquisición y ajuste de señales que exige el prototipo.

En consecuencia, el estudiante logrará contextualizarse extendiendo su perspectiva en el proceso de control y aplicación de los conceptos relacionados con la instrumentación industrial como lo son: normas, medidas y técnicas.

Para fundamentar lo anteriormente mencionado, también se tuvo en cuenta el proyecto, “Diseño e implementación de medios de laboratorio para contribuir al proceso de enseñanza aprendizaje en el área de instrumentación industrial” (M. Moreira B., 2009), que desde una mirada general, diseña e implementa una planta experimental donde recrea un entorno de instrumentación industrial. Un punto en común entre la planta anteriormente mencionada y la que se quiere realizar, es que tiene como propósito apoyar las prácticas de laboratorio (específicamente las que atañen con los sistemas de control) y por ende contextualizar al estudiante con lo referente a los sistemas de control.

### **1.3. OBJETIVOS.**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Construir el prototipo de una planta de procesos industriales para el control de las variables fundamentales, como apoyo a las prácticas del área de control.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Definir el esquema del sistema hidráulico de la planta que se ajuste a las exigencias de diseño: movilidad, peso, durabilidad, dimensiones, seguridad industrial y que instrumente las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura).

- Seleccionar los componentes que cumplan con los requerimientos de diseño para ensamblar la planta, tal como válvulas con respuesta lineal, tanques, sensores y electrobomba.
- Examinar el funcionamiento de la planta, por medio de un laboratorio de control de prueba, en el cual incluya las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura) y todos los actuadores presentes en la planta (válvulas, electrobomba, etc.).

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. MARCO CONCEPTUAL.**

A continuación se reúne la teoría necesaria, para el desarrollo del presente proyecto.

#### **2.1.1. SISTEMA DE CONTROL.**

Es un esquema de organización, métodos, procedimientos y resultados, integrado de confiables mecanismos de verificación o evaluación, con el fin de procurar una adecuada gestión, de todas las actividades y operaciones. Está integrado de subsistemas (eléctrico, mecánico, neumático) encargados de actuar sobre el sistema.

Esta clase de sistemas debe cumplir con ciertas propiedades para que su funcionamiento sea el más óptimo, tal como lo menciona Mavainsa.com (2017):

Las principales características que se deben buscar en un sistema de control serán:

- 1 Mantener el sistema estable, independiente de perturbaciones y desajustes.
- 2 Conseguir las condiciones de operación objetivo de forma rápida y continua.
- 3 Trabajar correctamente bajo un amplio abanico de condiciones operativas.



4 Manejar las restricciones de equipo y proceso de forma precisa. (p. 1)

### **2.1.2. CONTROL DE PROCESOS.**

Integra varias especialidades como los sistemas de control, automatización y electrónica en general. Un proceso industrial está relacionado con el desarrollo y posterior cumplimiento de necesidades establecidas, su eje fundamental es la elaboración de un objeto final. Su importancia en la industria radica en reducir costos, con el fin de optimizar el proceso industrial, al ser automático y autorregulado, se evitan factores como el desgaste y errores que se encuentren en el proceso.

Es preciso mencionar la descripción respecto a las propiedades del control de procesos en Mavainsa.com (2017):

El control del proceso se fundamentará en la adquisición de entradas, respectivo procesamiento de variables y correlación de valores estipulados por el usuario, para posterior cambio, en dado caso de que se produzca alguna derivación respecto al alcance preestablecido de algún parámetro del proceso.

Al momento de consolidar óptimamente un sistema de control de procesos, implica que de él se obtengan beneficios en la operación como lo son:

- Incremento de la productividad
- Mejora de rendimientos
- Mejora de calidad
- Ahorro energético
- Control medioambiental
- Seguridad operativa

- Optimización de la operación del proceso / manejo del equipo
- Fácil acceso a los datos del proceso (p.2).

### 2.1.3. TIPOS DE MEDICIÓN

Según CREUS (2010) define que “De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.” (p. 26). La tipificación anteriormente citada está supeditada principalmente a los diversos tipos de señales medidas, recalcando que no tiene relación dependiente del sistema en cuanto a la conversión de dicha señal que exige el proceso.

### 2.1.4. MEDIDAS DE PRESIÓN

Creus (2010) define esta medida como:

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse (ver figura 1) en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). El pascal es 1 Newton por metro cuadrado ( $1 \text{ N/m}^2$ ), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de masa 1 Kg le comunica una aceleración de  $1\text{m/s}^2$ . (p.91).

Teniendo en cuenta el Newton y empleando como unidad de superficie el metro cuadrado, se obtiene como unidad de presión el Pascal, nombre del físico francés Blas Pascal.

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Entonces, Acedo (2003) define “Un pascal ( $Pa$ ) corresponde a la presión ejercida uniformemente sobre una superficie, en la cual la fuerza de 1 Newton actúa verticalmente sobre  $1\ m^2$ ” (p. 25).

|                     | Psi     | Pulgada<br>c. de<br>agua | Pulgada<br>c. de<br>Hg | Atmósfera              | kg/cm <sup>2</sup>     | cm c.<br>de a. | mm<br>c. de<br>Hg | Bar       | Pa                   |
|---------------------|---------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|-------------------|-----------|----------------------|
| Psi                 | 1       | 27,68                    | 2,036                  | 0,0680                 | 0,0703                 | 70,31          | 51,72             | 0,0689    | 6894,76              |
| Pulgada<br>c. de a. | 0,0361  | 1                        | 0,0735                 | 0,0024                 | 0,0025                 | 2,540          | 1,868             | 0,0024    | 249                  |
| Pulgada<br>c. de Hg | 0,4912  | 13,6                     | 1                      | 0,0334                 | 0,0345                 | 34,53          | 25,4              | 0,0338    | 3386,39              |
| Atmósfera           | 14,7    | 406,79                   | 29,92                  | 1                      | 1,033                  | 1033           | 760               | 1,0132    | $1,0133 \times 10^5$ |
| kg/cm <sup>2</sup>  | 14,22   | 393,7                    | 28,96                  | 0,9678                 | 1                      | 1000           | 735,6             | 0,98      | 98066                |
| cm c. de a.         | 0,0142  | 0,3937                   | 0,0289                 | 0,00096                | 0,0010                 | 1              | 0,7355            | 0,0009    | 98,06                |
| mm c. de Hg         | 0,0193  | 0,5353                   | 0,0393                 | 0,0013                 | 0,0013                 | 1,359          | 1                 | 0,00133   | 133,322              |
| Bar                 | 14,5    | 401                      | 29,53                  | 0,987                  | 1,02                   | 1020           | 750               | 1         | $10^5$               |
| Pa                  | 0,00014 | 0,0040                   | 0,00029                | $0,987 \times 10^{-5}$ | $0,102 \times 10^{-4}$ | 0,01           | 0,0075            | $10^{-5}$ | 1                    |

Figura No. 1 Unidades de presión. Tomada de (*Instrumentación Industrial, 2010, p. 91*)

#### 2.1.4.1. Clases de presión.

La presión se clasifica de distintas maneras, como lo ilustra la figura 2, dependiendo de su punto de referencia a presión cero. En la industria hay diversos instrumentos que posibilitan medir los distintos tipos de presión y resultan ser útiles para numerosas aplicaciones.

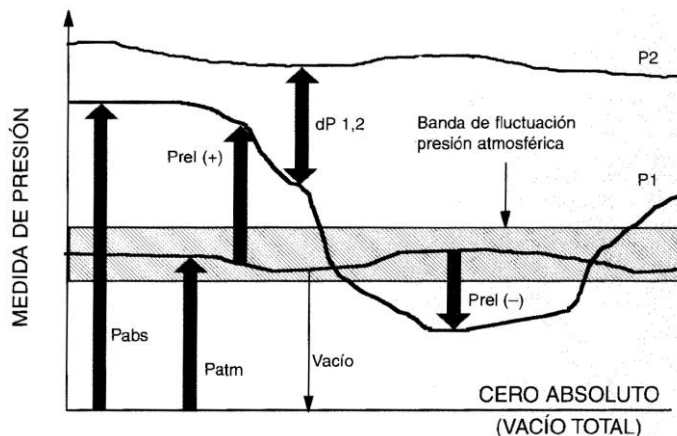


Figura No.2 Tipos de medida de presión, Tomada de (Control Avanzado de Procesos, 2003,p27)

#### 2.1.4.1.1 Presión Absoluta

Acedo (2003) define la presión absoluta como:

Si una presión está referida al cero absoluto se le conoce como presión absoluta, esta presión es de valor cero cuando no hay choque entre moléculas. Para distinguirla de otros tipos de presión se caracteriza por el sufijo o subíndice *abs*. Otra forma de identificar la presión absoluta es sumando la presión atmosférica a la presión relativa que indica cualquier manómetro. (p. 26).

#### 2.1.4.1.2 Presión Atmosférica

La presión atmosférica tiene un rol importante cuando se desea estudiar algún fenómeno, sus características dependen, tal como lo dice su nombre, de la atmosfera y las condiciones del ambiente en donde se toman muestras.

Respecto al concepto, Acedo (2003) detalla:

Se ocasiona por el peso de la atmosfera que rodea la tierra hasta una altitud aproximada de 500 Km. Desde la superficie de la tierra hasta esta altitud se produce una caída de

presión constante, llegando a presión cero a los 500 Km. La presión atmosférica depende de los cambios climáticos tomándose como referencia la existente como valor medio de nivel de mar, denominada atmosfera. (p. 26).

#### **2.1.4.1.3 Presión diferencial**

Acedo (2003) la define como:

Es la diferencia entre dos presiones  $P_1$  y  $P_2$ , Cuando se mide la diferencia de presión entre dos puntos, habitualmente con el mismo cero de referencia, la medida se denomina presión diferencial  $P_{1,2}$  o también  $dP_{1,2}$  (p. 26).

$$dp = P_1 - P_2$$

#### **2.1.4.1.4 Presión relativa**

Es necesario tenerla en cuenta para ciertas aplicaciones en la industria, además la presión relativa está contemplada tanto por la presión absoluta como la atmosférica.

Bajo esta premisa es importante tener en cuenta lo que precisa Acedo (2003):

Es la diferencia entre la medición de presión a absoluta y la presión atmosférica, cuando la presión relativa es positiva es cuando la presión absoluta es mayor que la atmosférica, de esta manera si la presión absoluta es menor que la atmosférica será negativa, la presión relativa puede ser negativa o positiva respecto a la presión atmosférica (p. 27).

#### **2.1.4.2. Métodos para medir la presión**

Hay gran variedad de métodos para medir la presión, pero es necesario tener en cuenta el rango de medida, tal y como lo menciona Acedo (2003), puede estar comprendido en:

- Algunos milímetros de columna de agua (mm CA)

- Muchos kilogramos por centímetro cuadrado

Además la referencia de presión se puede obtener de manera directa o indirecta, cuando un instrumento mide la presión directamente implica que está midiendo la magnitud de acuerdo a las leyes y obtienen la indicación a partir de ellas. Cuando los instrumentos miden la presión de manera indirecta es cuando utilizan algún efecto, como deflexión elástica, efecto óptico, eléctrico, etc., para indicar la presión medida. (p. 31)

#### **2.1.4.2.1. Medida directa de presión**

Es importante mencionar que cuando se desea medir la presión de manera directa se emplea el instrumento denominado manómetro, ya que es el más empleado en la práctica, aunque hay otros tipos de medidores, tal y como lo contempla Acedo (2003), que tienen la misma función. Cuando se emplean estos instrumentos éstos se encargan de determinar y/o señalar la presión de acuerdo a las fórmulas:

$$P = F_N/S$$

$$dP = dh * \rho * g \text{ (p. 31).}$$

##### **2.1.4.2.1.1 Medida directa de presión con columna de líquido**

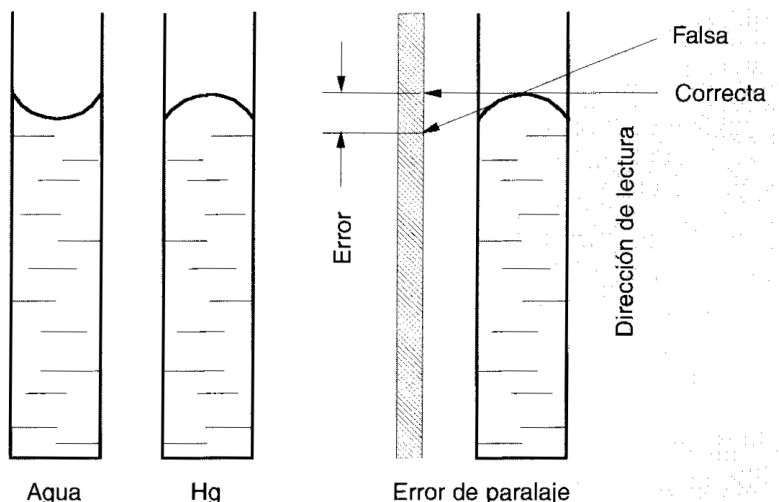
El manómetro de columna de líquido es una manera común de medir directamente la presión, cuyo principio se basa en aplicar la ecuación que relaciona la presión estática de fluidos:

$$dP = dh * \rho * g.$$

Es importante recalcar lo que Acedo (2003) respecto a esta medida:

La presión medida  $P$  se compara con el peso de una columna de líquido  $h$ . La altura de líquido en la columna se puede visualizar en una escala adosada a la propia columna. La

selección del líquido depende de la magnitud de la medida a realizar, siendo los más habituales agua y mercurio. (p. 32).



*Figura No. 3 Visualización de la medida obtenida con una columna de líquido, Tomada de (Control Avanzado de procesos, 2003, p. 32)*

#### **2.1.4.2.2 Medida indirecta de presión**

Cuando la presión es medida de manera indirecta por medio de diversos instrumentos, como los convertidores o transmisores, Acedo (2003) plantea que: “estos instrumentos convierten la presión existente a la entrada, en un señal de salida, generalmente eléctrica o neumática. Esta salida es función de la presión de entrada, y puede ser de naturaleza digital o analógica”. (p. 31).

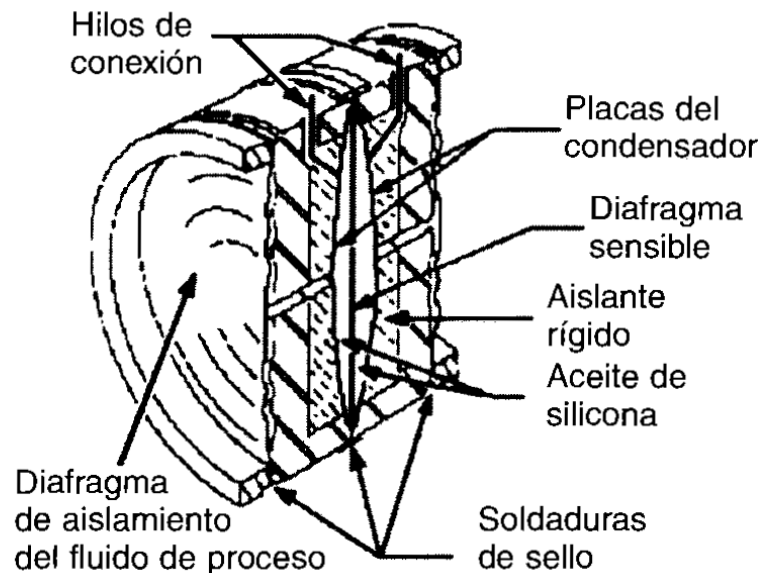
##### **2.1.4.2.2.1 Medida indirecta de presión con instrumentos basados en señales eléctricas**

Respecto a este método de medir presión, Acedo (2003) señala que: “Este tipo de instrumentos convierte la deformación producida por la presión en señales eléctricas. Las señales son amplificadas y enviadas al sistema de indicación correspondiente” (p.37).

En la actualidad se pueden localizar distintos tipos de instrumentos que se rigen bajo las características anteriores:

- Cambio en la resistencia eléctrica de un conductor
- Cambio en la inductancia de una bobina
- Cambio en la capacidad de un condensador.
- Cambio en la carga eléctrica de un material

La figura 4 evidencia a manera de ejemplo el comportamiento de una célula de medida de presión diferencial basada en la variación de capacidad de un condensador



*Figura No. 4 Célula de medida de presión diferencial, Tomada de (Control Avanzado de Procesos, 2003, p. 37)*

Respecto a la célula de medición de presión diferencial, Acedo (2003) menciona que:

La presión de proceso se transmite a uno de los lados del diafragma mientras que la presión atmosférica o la presión de referencia se transmite al otro lado del diafragma. Durante la operación, el diafragma de aislamiento del fluido de proceso detecta y transmite la presión del proceso al aceite de silicona, el cual a su vez la transmite al



diafragma sensible que se encuentra en el centro de la célula de medida. En respuesta a la presión diferencial que actúa sobre el diafragma, éste sufre un desplazamiento proporcional a la diferencia de presión. (p. 37)

### 2.1.4.3. Presión en los líquidos

La presión en un fluido es expuesta por Acedo (2003) como:

La presión en un punto cualquiera se define como la relación que existe entre la fuerza normal ( $dF_N$ ) y la pequeña superficie ( $dS$ ) sobre la que se ejerce.

$$P = df_n/dS.$$

Si la presión es la misma en todos los puntos de una superficie plana  $S$ , la ecuación anterior se transforma en:

$$P = F_N/S. \text{ (p.27).}$$

#### 2.1.4.3.1 Presión Hidrostática

La Hidrostática se refiere al análisis y/o tratamiento de fluidos en reposo, cabe resaltar que cuando de fluidos se habla, los líquidos y gases tienen un rol importante. De esta manera Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu (2017) señala que: “La presión ejercida en un fluido estático depende solamente de la profundidad del fluido, la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad.” (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pflu.html>). De acuerdo a lo anterior se obtiene la ecuación de la estática (referente a la hidrostática) en fluidos:  $\frac{dP}{dh} = \rho * g$

Donde:

$\rho =$  Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$g =$  Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$h =$  Profundidad del fluido ( $m$ )

En este caso particular, es importante recalcar que la presión no tiene dependencia ni con la forma ni con la masa del líquido como lo ilustra la figura 5.

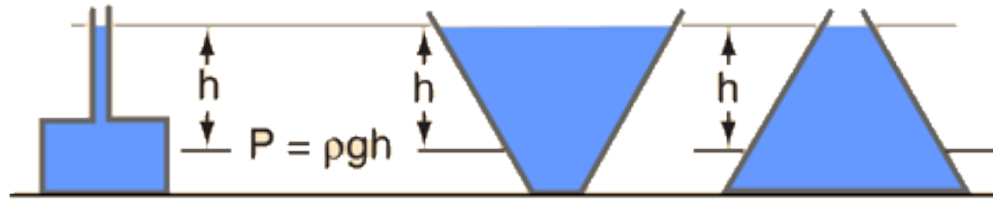


Figura No .5 Presión en un fluido estático, Tomada de (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pflu.html>)

### 2.1.5. MEDIDAS DE CAUDAL

En el tratamiento y medición de fluidos, en este caso agua, cuando el líquido pasa por una tubería y proviene de algún elemento que la suministra (bomba de agua), su medición se da en una unidad de tiempo y se le conoce como caudal. Eso permite definirla como: el volumen del fluido el cual atraviesa por cierta sección de flujo de agua en un determinado lapso de tiempo. Según sea el caso y la cantidad de volumen que se mida, el caudal se puede medir en metros cúbicos de agua por día ( $m^3/día$ ), litros por minutos ( $L/min$ ), y litros por segundo ( $L/seg$ ). De esta manera se obtiene:

$$Q = \text{caudal} = \text{Velocidad media} * \text{Sección transversal del ducto o tubería.}$$

Referente a la medida de caudales, Creus (2010) es importante recalcar:

Tiene gran utilidad en los procesos industriales, laboratorios y plantas piloto, su propósito fundamental es medir el caudal ya sea de líquidos o gases. El caudal y su respectiva medición son fundamentales para poder efectuar el control, de allí se deben tener estrictos cuidados para su óptima medición. Existen distintos tipos de medidores, tal como lo expresa la figura 6, pero los que más se emplean actualmente son: Medidores por área

variable, por desplazamiento positivo, másicos y finalmente por presión diferencial. Los métodos para poder medir el caudal están ligados al tipo de caudal. (p. 105).

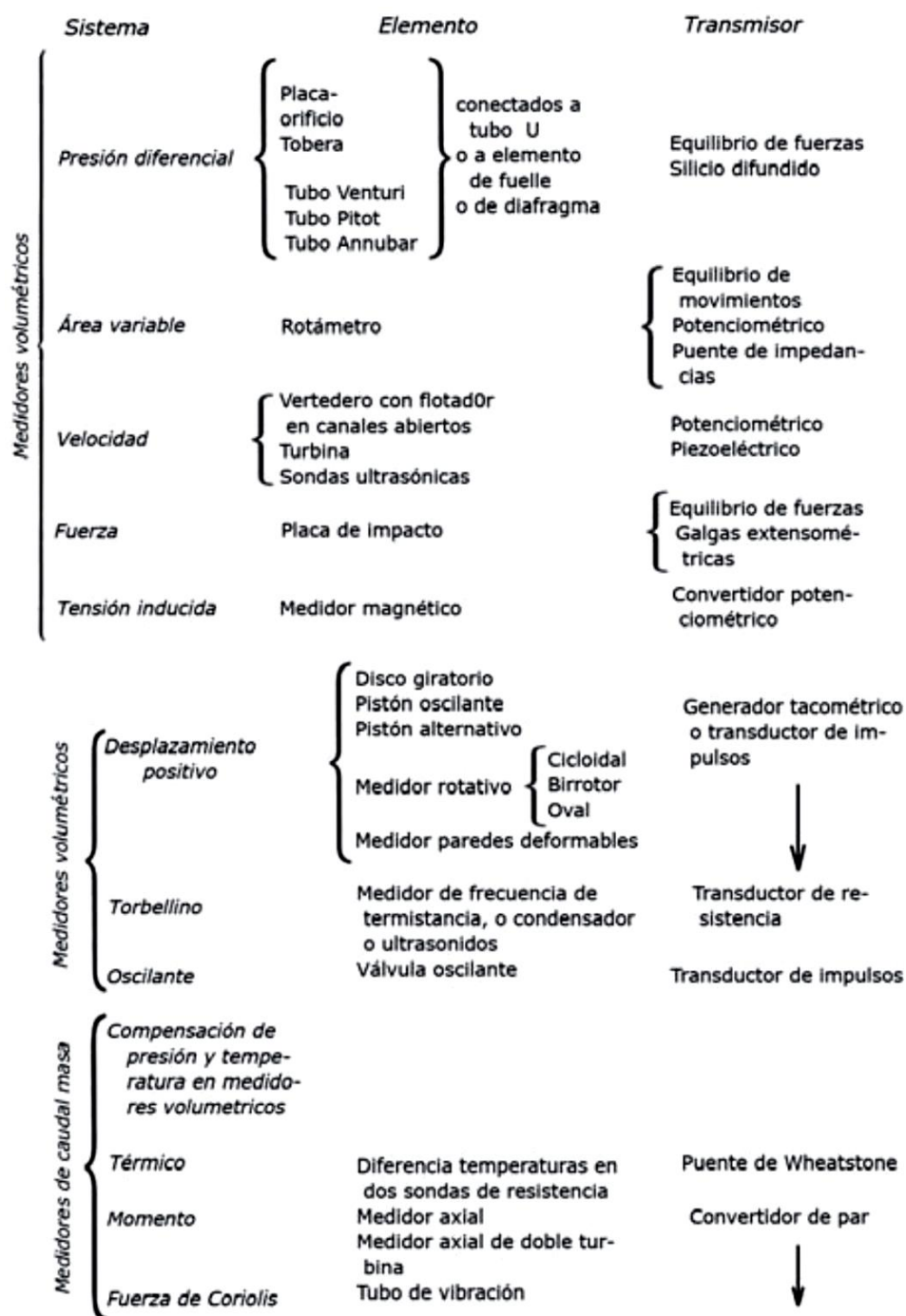


Figura No. 6 Principios de medida en caudales, Tomada de (*Instrumentación Industrial, 2003,*

### 2.1.5.1 Medición De Caudal Por Área Variable

Los medidores de área variable o también llamados rotámetros, se caracterizan por emplear la correlación entre la energía cinética y la energía proveniente de la presión del fluido, dicho de otro modo por presión diferencial.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, Acedo (2003) menciona:

En el sistema de presión diferencial ( $dP$ ) el área correspondiente a la restricción es constante y la presión diferencial cambia en función del caudal ( $Q$ ).

Obteniendo:

*Medidor por presión diferencial  $Q = f(dP)$  con Área constante*

En el rotámetro el área de la restricción cambia al mismo tiempo que el caudal, permaneciendo constante la presión diferencial

*Medidor por área variable  $Q = f(\text{Área})$  con  $dP$  constante (p. 5).*

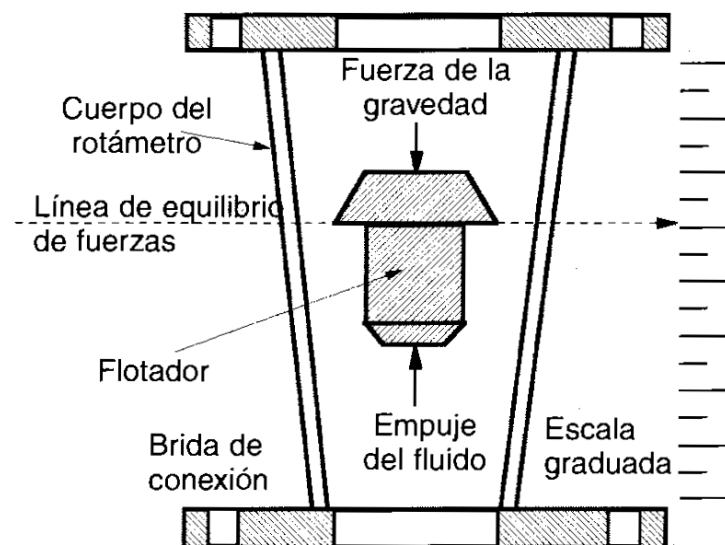


Figura No. 7 Rotámetro, Tomada de (Control Avanzado de Procesos, 2003, p. 5)

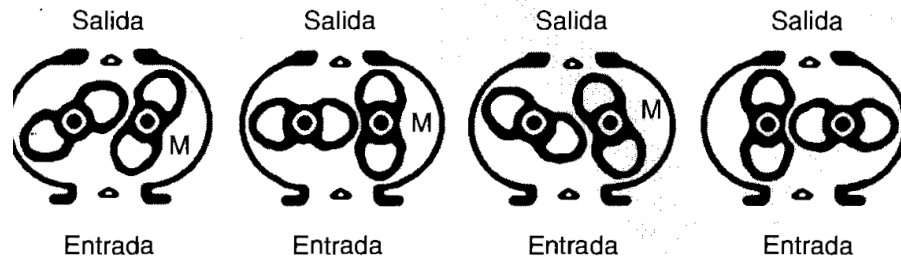
### 2.1.5.2 Medición De Caudal Por Desplazamiento Positivo

Esta manera de medir caudal, Acedo (2003) la define:

Los medidores por desplazamiento positivo operan atrapando un volumen unitario y conocido de líquido ( $V_u$ ), desplazándolo desde la entrada hasta la salida, y contando ( $N$ ) el número de volúmenes desplazados en un tiempo determinado ( $t$ ). Se conocen con el nombre genérico de contadores porque cuentan el volumen de líquido, independientemente del tiempo transcurrido. Si se desea obtener la medida en forma de caudal ( $Q$ ), hay que incluir la unidad de tiempo, teniendo entonces que:

$$Q = \frac{V_u * N}{t}$$

Dependiendo de las unidades utilizadas se tendrá se tendrá la medida de caudal en: litros/min,  $m^3/h$   $m^3/día$   $m^3/mes$ , etc. La lectura se realiza por medio de un sistema de transmisión mecánica desde el interior del contador hasta el exterior, en cuyo final se encuentra un conjunto de engranajes que hacen mover un contador totalizador de caudal. (p. 6).



*Figura No. 8 Contador tipo rueda oval, Tomada de (Control Avanzado de Procesos, 2003, p. 6)*

### 2.1.5.3 Medidores De Caudal Másicos

Comúnmente los medidores de caudal por medición volumétrica de caudal, son empleados en distintas aplicaciones, pero en ciertas aplicaciones también se hace necesario medir el caudal masa, Creus (2010) resalta: “de estos medidores se obtiene ya sea por la compensación de la presión, temperatura o densidad, y también obteniendo provecho de las facultades de la medición de la masa con sistemas básicos de medida directa, entre otros.” (p. 182).

También cabe resaltar lo que puntualiza Acedo (2003) en que: “los medidores másicos están diseñados para medir directamente el caudal de fluido en unidades de masa, tal como  $kg/h$ , en lugar de medir el caudal en volumen como  $m^3/h$ .”(p. 7).

#### 2.1.5.3.1 Medidores de volumen con conversión a masa en función de presión y temperatura

En algunos casos, para obtener correctamente la medición en masa, existen medidores que tienen acoplados sistemas que realizan la conversión de volumen en masa en función de presión y temperatura, haciendo que la medida de caudal esté expresada en unidades de masa. Para obtener la medida, estos medidores contienen placas con aberturas que miden tanto la presión como la temperatura.

Como los medidores tienen diversas maneras de efectuar la medición dependiendo del tipo de fluido, Creus (2010) señala:

En los líquidos, como son incompresibles, la densidad varía por los cambios en la temperatura del fluido. Si se instala un transmisor de densidad que mida ésta en

condiciones de servicio, bastará aplicar su salida directamente a la salida del transmisor de caudal para tener así el caudal corregido.

De esta manera el caudal para un fluido incompresible se define por medio de la expresión:

$$Q_p = \sqrt{K(p_a - p_c)\rho_0} \text{ kg/h}$$

Donde:

$K$  = Constante

$p_a - p_c$  = Presión diferencial creada por el elemento

$\rho_0$  = Densidad del líquido en condiciones de servicio (p. 182)

#### **2.1.5.3.2 Medidores directos de caudal en masa**

Los medidores que obtienen directamente la medición de caudal en masa, son los del tipo momento angular o los que emplean el efecto Coriolis.

Referente al medidor de tipo momento angular Acedo (2003) lo describe como:

Constan de dos rotores introducidos en el paso del fluido. El primero de los rotores se hace girar a velocidad constante para imprimir una velocidad angular al fluido, mientras que el segundo permanece fijo. Esto hace que se produzca un par de torsión en el segundo rotor proporcional al caudal en masa (p. 8).

Cuando un medidor está constituido por emplear el efecto Coriolis (como el de la Figura 9), esto significa que hay un cuerpo en movimiento referido al sistema de coordenadas, rota con velocidad angular el cual experimenta una fuerza de tipo Coriolis (atribuida al científico francés Gaspard Coriolis), la cual es proporcionada tanto por la masa y velocidad del fluido, como la velocidad angular del sistema.

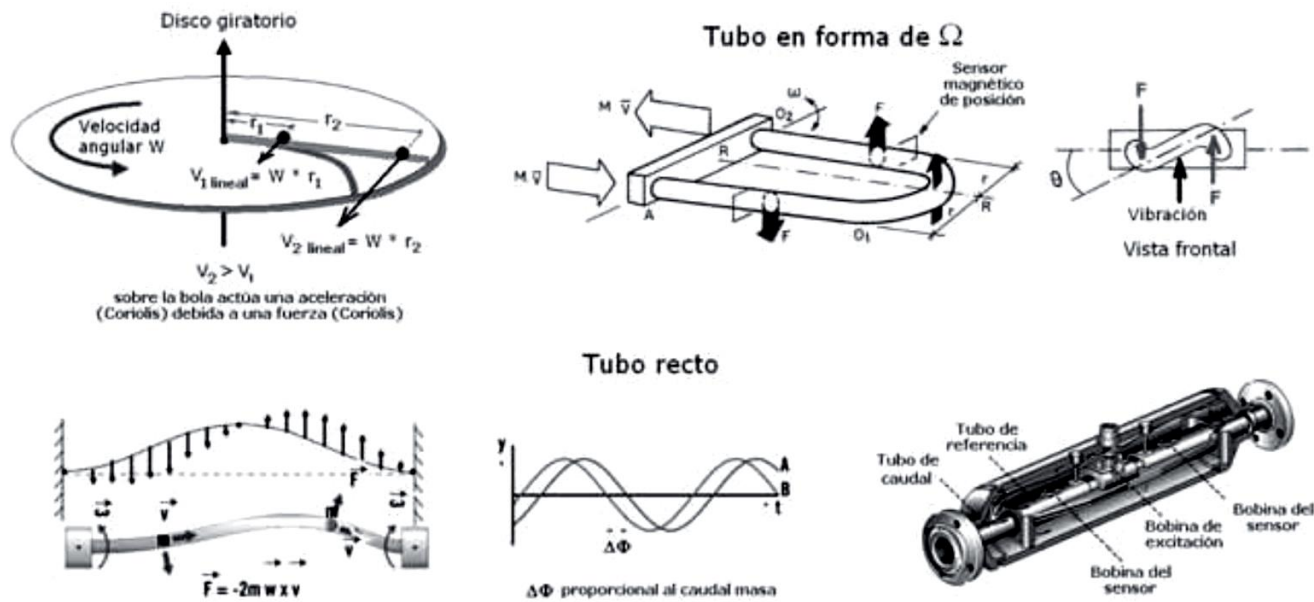
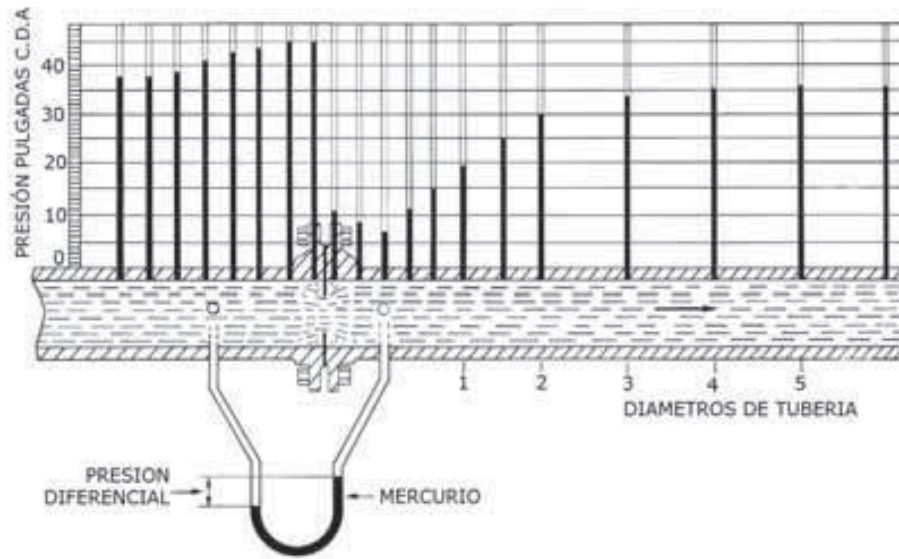


Figura No. 9 Medidor de Coriolis, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 191)

#### 2.1.5.4 Medida de caudal por presión diferencial

La medición de caudal por medio de presión diferencial, es uno de los métodos más conocidos en la instrumentación, como su nombre lo dice, se basa en la diferencia de presiones ya que el fluido se estrecha por la tubería donde atraviesa, haciendo que se adquiera la presión diferencial por medio de dos puntos de presión ubicados tanto aguas arriba como aguas abajo (Ver figura 10). Para el cálculo de caudal por medio de la diferencia de presiones Creus (2010) menciona: “La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernouilli (*altura cinética + altura de presión + altura potencial = constante*) a una tubería horizontal.” (p. 106).





*Figura No. 10 Presión diferencial creada por la placa orificio, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 106)*

### 2.1.6. MEDIDAS DE NIVEL

El nivel es una medida trascendental en la instrumentación, ya que en este caso establece la cantidad o el contenido de un fluido que hay un tanque (medición de la altura), en muchos casos es empleado para seguridad y protección de la capacidad de un recipiente. El nivel posibilita medir la posición de un fluido (estableciéndolo ya sea de manera vertical u horizontal) respecto a una línea de referencia.

Hay diversas maneras de obtener esta medición, la selección de la estrategia para medir el nivel de un líquido dependerá de las necesidades del usuario.

Respecto al concepto de *medición de nivel* Creus (2010) alude que:

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir "inteligencia" en la medida del nivel, y obtener exactitudes en la lectura altas, del orden del  $\pm 0,2\%$ , en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso.

El transmisor de nivel "inteligente" hace posible la interpretación del nivel real (puede eliminar o compensar la influencia de la espuma en flotación del tanque, en la lectura), la eliminación de las falsas alarmas (tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento), y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión.

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos, que son dos mediciones claramente diferenciadas. (p. 195)

#### **2.1.6.1. Medición de nivel en líquidos**

Es común que la medición de nivel en los líquidos se obtenga empleando la medición directa de la altura de un líquido respecto a una línea de referencia, en otros casos por medio del desplazamiento de un flotador que es generado por el movimiento del líquido, y en otros por medio de la presión hidrostática. En la actualidad hay diversas maneras de obtener la medición de nivel en líquidos, esto hace que también existan medidores que emplean fenómenos diferentes como las características eléctricas del líquido o bien utilizando otros fenómenos.

Respecto a los instrumentos de medición de nivel según Creus (2010) indica:

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal, nivel de flotador, magnético, palpador servo operado y magnetoestrictivo.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática son:

- Medidor manométrico
- Medidor de tipo burbujeo
- Medidor de presión diferencial de diafragma

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento.

Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido son:

- Medidor resistivo/conductivo
- Medidor capacitivo
- Medidor ultrasónico
- Medidor de radar o microondas
- Medidor de radiación
- Medidor de láser

Y los que se basan en otros fenómenos:

- Medidor óptico
- Vibratorio
- Detector de nivel térmico o de dispersión térmica. (p.195)

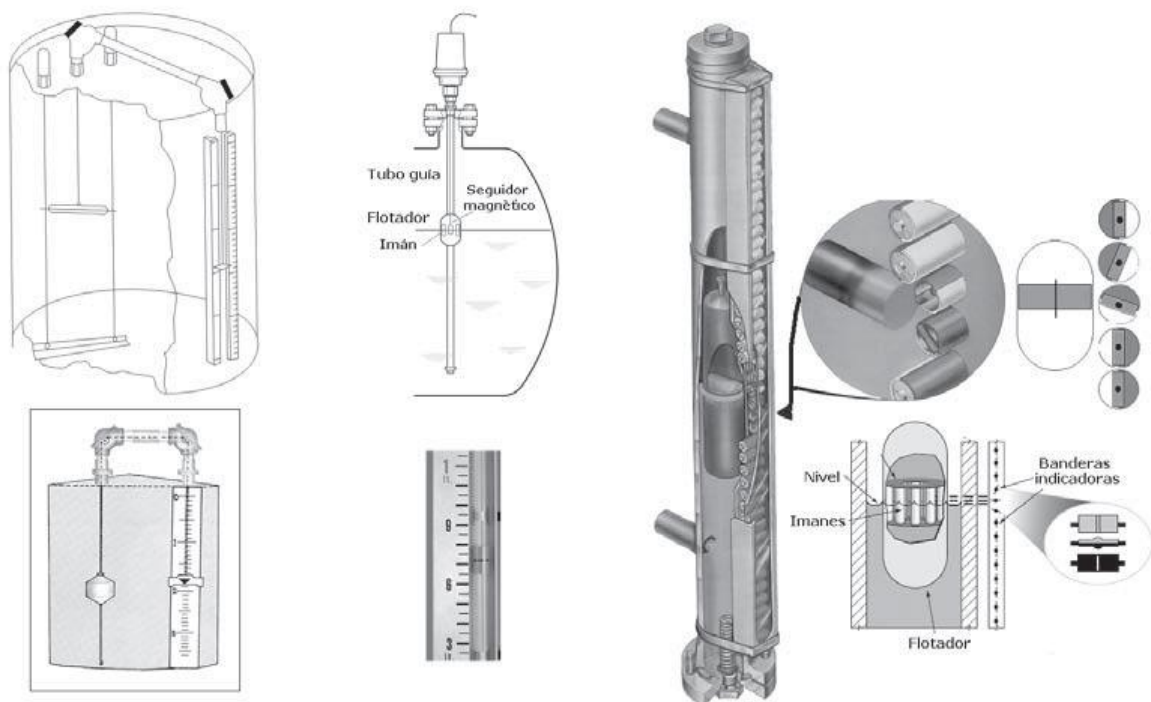


Figura No. 11 Medidores de nivel con flotador, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p.

198)

### 2.1.6.1.1 Medición de nivel por medio de la presión hidrostática

En este caso particular no se mide directamente el nivel, pero sí la presión hidrostática del líquido, ya que es importante mencionar que la presión que ejerce el líquido en el recipiente es proporcional a la altura de columna, de esta manera se facilita medir su altura y por consiguiente el nivel al que está el líquido. El nivel se calcula mediante la fórmula de la presión hidrostática:

$$P = h * \rho * g$$

Dónde:

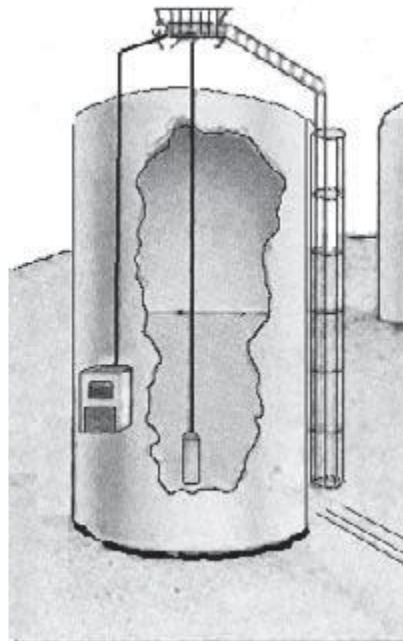
$P$  = Presión

$h$  = Altura de la columna de líquido

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\rho$  = Densidad relativa

Empleando la fórmula anterior, es pertinente mencionar que la posición donde esté el sensor de presión y las características del líquido (referente a la temperatura) tienen un rol importante. Un ejemplo de esta medida es el que se puede observar en la figura 12.



*Figura No. 12 Medidor manométrico de nivel, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 201)*

A la hora de realizar esta medición de nivel, en Gil Trejos y Robayo García (2011) se precisa que:

La medición de nivel con transmisor de presión se utiliza preferentemente en tanques abiertos expuestos a la atmósfera. En estos casos, la presión medida es igual a la presión de la columna de líquido más la presión atmosférica (presión en la superficie). La presión en la superficie suele ser despreciable porque la mayoría de los sensores de presión

disponen de dispositivos que compensan la presión atmosférica. Para estos casos, los transmisores se montan en la parte más baja del tanque. Si el sensor no se puede montar directamente en el lateral del tanque al nivel adecuado, se puede montar en el extremo de una barra o cable y bajarlo desde la parte superior del tanque hasta la profundidad oportuna. (p. 30)

### **2.1.7. MEDIDA DE TEMPERATURA**

La temperatura se refiere a la sensación de frío o calor, y su magnitud es escalar, la cual corresponde a la energía de un sistema determinado. Si la energía (desplazamiento o circulación de partículas) del sistema propende a ser mayor, la sensación de calor aumentará. En la actualidad las unidades de la temperatura se segmentan de dos maneras: unidades tanto relativas como absolutas, de ésta última están las escalas tanto en Kelvin (K) como en Rankine (R) y de las relativas se clasifican en las unidades en grados Celsius °C, grados Fahrenheit °F y Grados Réaumur °R.

Una medida muy común y relevante en la instrumentación de procesos es la medición de temperatura, ya que puede aprovechar su energía de diversas maneras. El sistema de medición de la temperatura se establece dependiendo su aplicación.

Por esto es importante mencionar lo que Creus (2010) alude:

Existen diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y que son utilizados para medirla:

- a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- c) Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).

- d) La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).
- f) Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).(p. 235).

### 2.1.7.1 Tipos De Termómetros

En la actualidad hay un sinnúmero de instrumentos que miden la temperatura, dependiendo de las características de fabricación, el sistema a medir y la aplicación del instrumento. Un instrumento medidor de temperatura muy empleado en la actualidad, es el termómetro de vidrio, este tipo de termómetro está conformado por un recipiente vidrio el cual hay almacenado mercurio el cual se expande cuando se calienta y sube en el tubo capilar.



Figura No. 13 Termómetro de vidrio, tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 236)

Otro instrumento que se emplea para medir la temperatura, es el termómetro bimetálico, como su nombre lo dice, consta de dos metales rectos o curvos que son fundamentados por su coeficiente de dilatación y que usualmente están constituidos de latón o acero.

Creus (2010) menciona:

La relación entre el ángulo de torsión de la lámina bimetálica y la temperatura viene expresada por:

$$\alpha = \frac{360}{\pi} * \frac{a * l}{s} * (t_2 - t_1)$$

Con:

$a$  =Coeficiente de expansión térmica

$l$  =Longitud de la lámina bimetálica

$s$  =Espesor de la lámina bimetálica

Un termómetro bimetálico típico contiene pocas partes móviles, sólo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o hélice y el propio elemento bimetálico. El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes, y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos. No hay engranajes que exijan un mantenimiento.

El uso de termómetros bimetálicos es admisible para servicio continuo de 0 °C a 400 °C. Para indicación local se usan, preferiblemente, los termómetros bimetálicos de esfera orientable. De este modo, el operario puede leer la temperatura a distancia desde niveles distintos, al de la instalación. La exactitud del instrumento es de  $\pm 1\%$  y su campo de medida es de -200 °C a +500 °C. (p. 237).

### **2.1.7.2 Termopar**

Un instrumento que también es empleado para la medición de temperatura es el termopar, el cual se fundamenta en la desplazamiento de corriente en un circuito el cual está cerrado por dos metales de temperaturas diferentes (frío y caliente), haciendo que se manifiesten los efectos Peltier y Thomson (Ver figura 14), los cuales consisten en liberar o absorber calor en la unión de tales metales.

Como los termopares están compuestos de distintos materiales, existe una clasificación que va de acuerdo al tipo de material en que están fabricados los metales que componen el termopar, esta clasificación se puede observar en la figura 15.



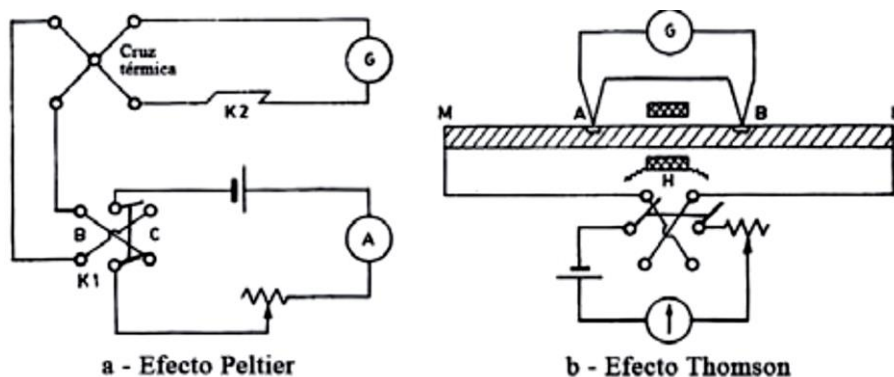


Figura No. 14 Efectos Peltier y Thomson, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 255)

| Tipo de termopar | Materiales  | Rango normal       |
|------------------|---|--------------------|
| J                | Hierro – Constantan                                     | -190 °C a 760 °C   |
| T                | Cobre – Constantan<br>Cobre – (Cobre-Níquel)            | -200 °C a 370 °C   |
| K                | Cromel – Alumel<br>(Cromo – Níquel) – (Aluminio-Níquel) | -190 °C a 1.260 °C |
| E                | Cromel – Constantan                                     | -100 °C a 1.260 °C |
| S                | (90 % Platino + 10 % Rodio) – Platino                   | 0 °C a 1.480 °C    |
| R                | (87 % Platino + 13 % Rodio) – Platino                   | 0 °C a 1.480 °C    |

Figura No. 15 Tipos de termopares, Tomada de (Control Avanzado de Procesos, 2010, p. 72)

### 2.1.8. CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS

En el campo de la instrumentación y control industrial existen normatividades para la representación y clasificación tanto de instrumentos, actuadores y elementos de control. Su importancia radica en estructurar un orden o jerarquía determinado, de tal manera que su representación esté presente en el campo de las organizaciones industriales. Para consolidar un sistema de denominación el cual posea designaciones como convenciones, códigos y simbología, existen dos reconocidas sociedades: la ISA (*Instrument Society of América*) originaria de EEUU y la DIN (*Deutsches Institut für Normung*) proveniente de Alemania, las cuales están

encaminadas a trabajar en la clasificación, normalización y designación de instrumentos a nivel industrial y científico.

### 2.1.8.1. Normatividad ISA

Las normas ISA (Instrument Society of America) son empleadas mayoritariamente en la industria para la clasificación de instrumentos, tal y como se puede representar en la figura 16, esta norma se encarga de designar un código alfanumérico con el fin de identificar un instrumento que compone el sistema de clasificaciones de la aplicación industrial.

Las normas establecen que en ámbitos generales los instrumentos deben estar identificados con letras, de tal manera que los clasifique de manera funcional. Además, es de tener en cuenta que dichas letras deben cumplir con ciertos parámetros (sufijos, orden, mayúsculas, etc.) con el objetivo de conservar una orden y/o jerarquía.

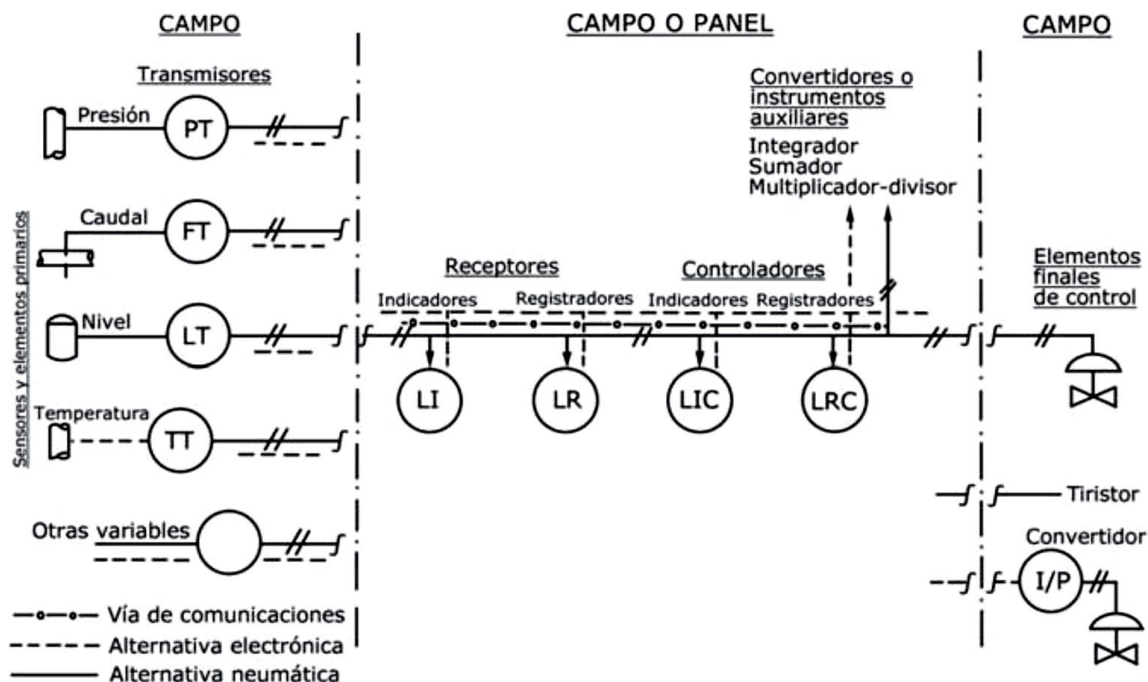


Figura No. 16 Normatividad ISA, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 27)

### 2.1.8.1.1 Norma ISA-S5.1-84 (R-1992)

Esta norma es la más empleada y se caracteriza por tener un orden cronológico, ya que sus actualizaciones y/o revisiones se realizan periódicamente.

A la hora de emplear la normatividad, Según Páez (s.f) se tiene en cuenta que:

En general, al realizar un plano de instrumentación, a cada instrumento se le asigna un icono consistente en un círculo que contiene un código alfanumérico llamado “TAG NUMBER”, el cual debe cumplir con ciertas características, ISA recomienda utilizar ciertas clases de líneas para representar flujos de proceso y señales de instrumentos. Además, define símbolos para válvulas, actuadores y otros; deja libertad para representar equipos de proceso. (p.2)

Cuando a un sistema industrial se le desea asignar la norma ISA, es necesario tener en cuenta la figura 17 junto con las siguientes recomendaciones:

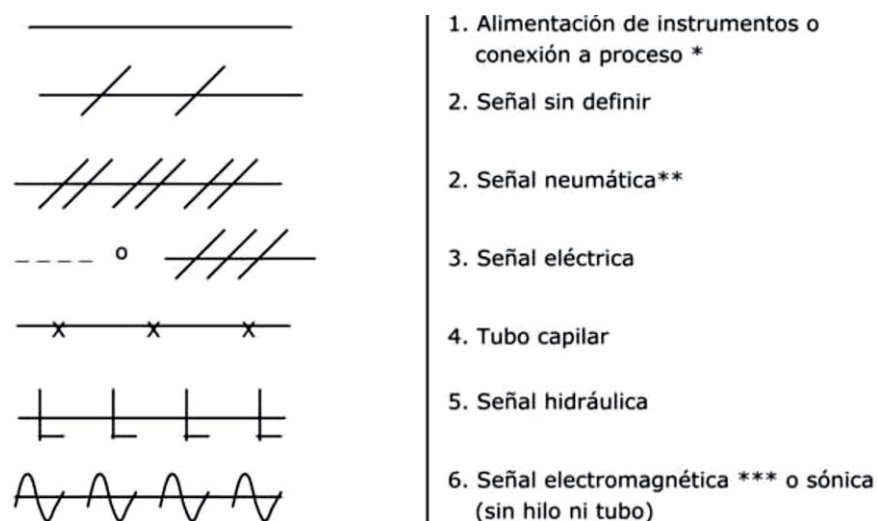
- El instrumento que componga el sistema debe ser descrito con un código alfanumérico que incluya un identificador numérico de lazo.
- La cantidad de letras que debe contener el identificador del instrumento no debe ser más de cuatro.
- Al numerar los bucles, estos pueden ser de manera paralela (iniciando una secuencia numérica para cada nueva letra) y en serie cuando determina los bucles de instrumentos de un proyecto y debe ir consecutivo al orden numérico establecido.
- Se añade un sufijo si el bucle contiene distintos instrumentos con la misma identificación funcional.
- Se debe distinguir por todas sus funciones a los instrumentos que tengan más de dos funciones.

- Cuando el instrumento contiene accesorios y no tienen su representación de manera explícita, se hace necesario designarle una identificación de acuerdo a la utilidad y hacer la relación con su número de bucle.

| PRIMERA LETRA(4) |                                  |                           | LETRAS SUCESIVAS(3)                 |   |                         |
|------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|
|                  | Variable medida o inicial        | Letra de modificación     | Lectura o función de lectura pasiva | Función de salida   | Letra de modificación   |
| <b>A</b>         | Análisis(5,19)                   |                           | Alarma                              |   |                         |
| <b>B</b>         | Quemador, combustión             |                           | Libre(1)                            | Libre(1)  | Libre(1)                |
| <b>C</b>         | Libre(1)                         |                           |                                     | Control(13)   |                         |
| <b>D</b>         | Libre(1)                         | Diferencial(4)            |                                     |   |                         |
| <b>E</b>         | Tensión(f.e.m.)                  |                           | Sensor (Elemento primario)          |   |                         |
| <b>F</b>         | Caudal                           | Relación(4)               |                                     |   |                         |
| <b>G</b>         | Libre(1)                         |                           | Vidrio, Dispositivo visión(9)       |   |                         |
| <b>H</b>         | Manual                           |                           |                                     |   | Alto(7,15,16)           |
| <b>I</b>         | Corriente(eléctrica)             |                           | Indicar(10)                         |   |                         |
| <b>J</b>         | Potencia                         | Exploración(7)            |                                     |   |                         |
| <b>K</b>         | Tiempo, programación tiempo      | Variación de tiempo(4,21) |                                     | Estación de control(22)                                   |                         |
| <b>L</b>         | Nivel                            |                           | Luz(11)                             |   | Bajo(7,15,16)           |
| <b>M</b>         | Libre(1)                         | Momentáneo(4)             |                                     |   | Medio, Intermedio(7,15) |
| <b>N</b>         | Libre(1)                         |                           | Libre(1)                            | Libre(1)  | Libre(1)                |
| <b>O</b>         | Libre(1)                         |                           | Orificio, Restricción               |   |                         |
| <b>P</b>         | Presión, Vacío                   |                           | Punto(Ensayo)Conexión               |   |                         |
| <b>Q</b>         | Cantidad                         | Integrar, Totalizar(4)    |                                     |   |                         |
| <b>R</b>         | Radiación                        |                           | Registro(17)                        |   |                         |
| <b>S</b>         | Velocidad, Frecuencia            | Seguridad(8)              |                                     | Interruptor(13)   |                         |
| <b>T</b>         | Temperatura                      |                           |                                     | Transmisión(18)   |                         |
| <b>U</b>         | Multivariable (6)                |                           | Multifunción(12)                    | Multifunción(12)  | Multifunción(12)        |
| <b>V</b>         | Vibración, Análisis mecánico(19) |                           |                                     | Válvula, Regulador tiro, Persiana(13)                     |                         |
| <b>W</b>         | Peso, fuerza                     |                           | Vaina, Sonda                        |   |                         |
| <b>X</b>         | Sin clasificar(2)                | EjeX                      | Sin clasificar(2)                   | Sin clasificar(2)   | Sin clasificar(2)       |
| <b>Y</b>         | Evento, Estado o Presencia(20)   | EjeY                      |                                     | Relé, Cálculo, Conversión(13,14,18)                       |                         |
| <b>Z</b>         | Posición, Dimensión              | EjeZ                      |                                     | Motor, Actuador, Elemento final de control sin clasificar |                         |

*Figura No. 17 Códigos de identificación de los instrumentos (ISA-S5.1), Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 29)*

A la hora de definir la simbología de trayectos o “direcciones” entre conexiones de varios dispositivos que conectan, se deben emplear en el plano tal como se puede observar en la figura 18.



*Figura No. 18 Clasificación de la simbología entre conexiones, Tomada de (Instrumentación Industrial, 2010, p. 31)*

### 2.1.9. Exactitud

CREUS (2010) define:

La exactitud (accuracy) es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida. En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor como si fuera el verdadero. El grado de conformidad independiente es la desviación máxima entre la curva de calibración de un instrumento y una curva característica específica, posicionada de tal como tal que se reduce al mínimo

dicha desviación máxima. La exactitud define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un periodo de tiempo determinado (normalmente 1 año). La exactitud se da en términos de inexactitud, es decir, un instrumento de temperatura de 0-100°C con temperatura del proceso de 100°C y que marca 99,98°C se aproxima al valor real en 0,02 °C, o sea que tiene una inexactitud de 0,02°C. Hay varias formas para expresar la exactitud:

- a) Tanto por ciento del alcance, campo de medida (*range*). Ejemplo: en el instrumento de temperatura de la figura 19-a, para una lectura de 150°C y una exactitud de  $\pm 0,5\%$ , el valor real de la temperatura estará comprendido entre  $150 \pm 0,5 \times 200/100 = 150 \pm 1$ , es decir, entre 149°C y 151°C.
- b) Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo : exactitud  $\pm 1^\circ\text{C}$
- c) Tanto por ciento de la lectura efectuada. Ejemplo: Exactitud de  $\pm 1\%$  de 150 °C, es decir,  $\pm 1,5^\circ\text{C}$
- d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo: exactitud  $\pm 0,5\%$ , es decir,  $\pm 0,5\%$  de 300 °C =  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .
- e) Tanto por ciento de la longitud de la escala. Ejemplo: si la longitud de la escala del instrumento de la figura 19-a es de 150 mm, la exactitud de  $\pm 0,5\%$  representara  $\pm 0,75$  mm en la escala.

La exactitud varía en cada punto del campo de medida si bien, el fabricante la especifica, en todo el margen del instrumento, indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Por ejemplo: un manómetro puede tener una exactitud de  $\pm 1\%$  en toda la escala y de  $\pm 0,5\%$  en la zona central. Cuando se desea obtener la máxima exactitud del

instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida. Por ejemplo: un termómetro de 0-150°C y de  $\pm 1\%$  de exactitud situada en un baño de temperatura constante a 80°C, puede ser calibrado a este valor, de modo que su exactitud en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón. Es obvio que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la exactitud se apartará de  $\pm 1\%$ . (p.14).

#### 2.1.10. Precisión

CREUS (2010) define:

La precisión (*precisión*) es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero en gran precisión. Por ejemplo, un manómetro de intervalo de medida de 0 a 10 bar, puede tener un error de cero considerable marcando 2 bar sin presión en el proceso y diversas lecturas de 7.049, 7.05, 7.051, 7.052 efectuadas a lo largo del tiempo y en las mismas condiciones de servicio, para una presión del proceso de 5 bar. Tendrá un error práctico de 2 bar, pero los valores leídos estarán muy próximos entre sí con una muy pequeña dispersión máxima de  $7.052 - 7.049 = 0.003$ , es decir, el instrumento tendrá una gran precisión.

Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos. A señalar que el término precisión es sinónimo de repetibilidad. (p.16).

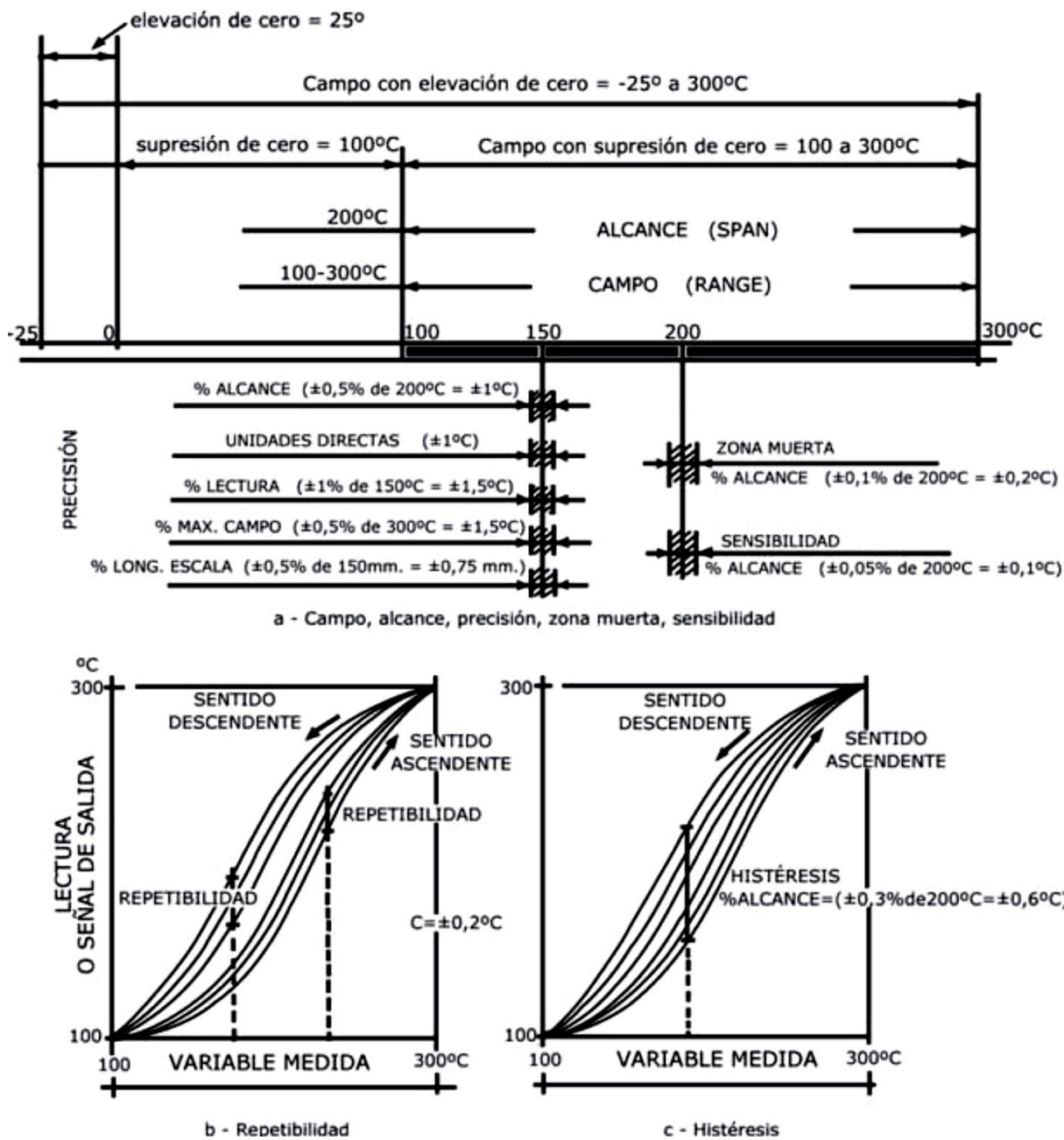


Figura No. 19-a Definiciones de los instrumentos, Tomada de (Instrumentación Industrial,

2010, p. 4)



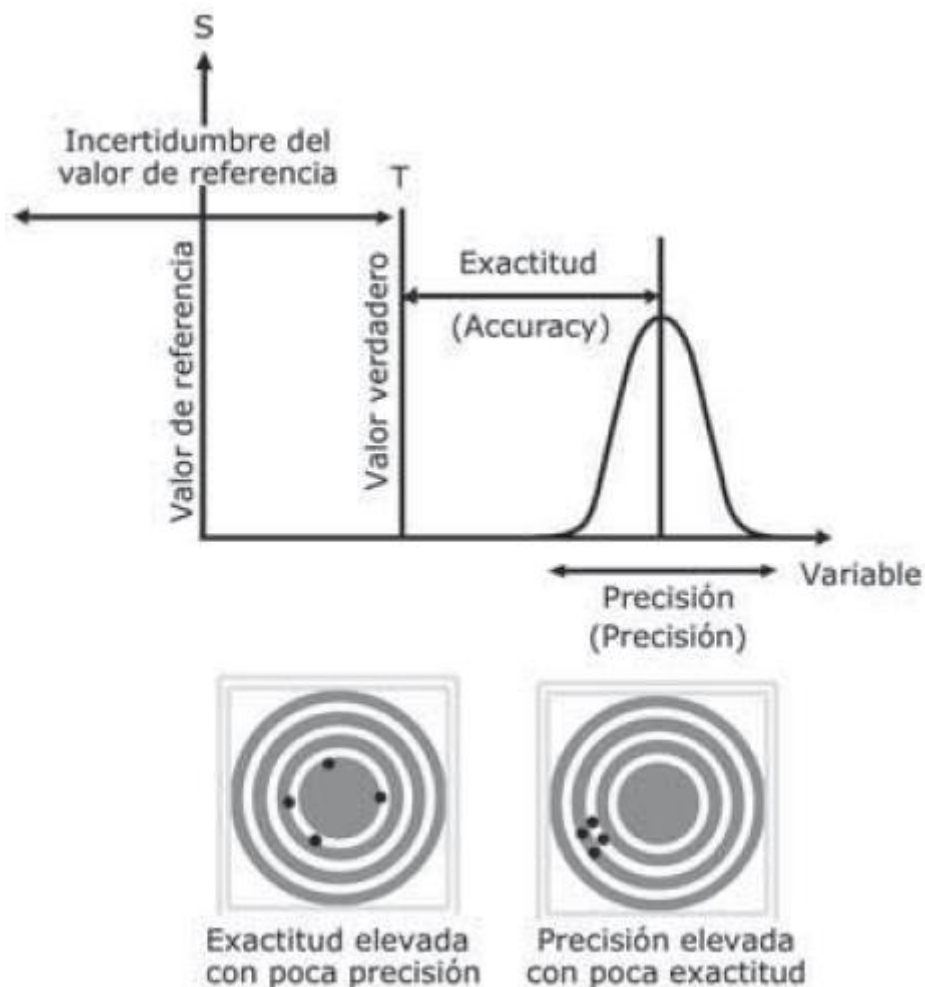


Figura No. 19-b Exactitud y precisión, Tomada de (*Instrumentación Industrial*, 2010, p. 15)

### 2.1.11. ZONA MUERTA

CREUS (2010) define:

La zona muerta (*dead zone o dead band*) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: en el instrumento de la figura 19-a es de  $\pm 0,1\%$ , es decir, de  $0,1 \times 200/100 = \pm 0,2^\circ\text{C}$ . (p.16).

### **2.1.12. PRINCIPIO DE BERNOULLI**

Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, (2017) define:

Daniel Bernoulli, explicó muchos fenómenos que ocurren en los fluidos a partir de la idea de que en estos fluidos la energía se conserva, el principio de Bernoulli, relaciona la velocidad de un fluido con su presión y además dice que la energía de un flujo es una constante, esta energía es proporcional al producto de la velocidad y la presión.

El comportamiento cualitativo que normalmente se evoca con el término “efecto de Bernoulli”, es el descenso de la presión del líquido en las regiones donde la velocidad del flujo es mayor. Este descenso de presión por un estrechamiento de una vía de flujo puede parecer contradictorio, pero no tanto cuando se considera la presión como una densidad de energía. En el flujo de alta velocidad a través de un estrechamiento, se debe incrementar la energía cinética, a expensas de la energía de presión. (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>).

### **2.1.13. VASOS COMUNICANTES**

Definista (2017) afirma lo siguiente:

Es una Ley aplicada en el campo de la física y la química que demuestra como un líquido homogéneo puede tener un mismo nivel al ser vertido en una serie de envases conectados a través de unos conductos sin que la forma u orientación de los vasos afecte el nivel. Este líquido, que se encuentra en estado de reposo al ser sumado con más líquido de la misma consistencia, aumentará su volumen pero mantendrá el nivel en todos los vasos. El nivel del líquido en los vasos se mantendrá aun cuando estos sean inclinados.

El principio científico en el que está basada esta teoría apunta a que se trata de la presión atmosférica y la gravedad, dos valores constantes que actúan directamente en el líquido contenido en el vaso, empujando hacia abajo de manera uniforme indiferentemente de la geometría de envase. Este principio, fue introducido Blaire Pascal quien aseveró con sus estudios que “La presión que se ejerce sobre un mol de líquido, se transmite íntegramente y con la misma intensidad en todas direcciones” a esto se le denominó “Principio de Pascal”.

(<http://conceptodefinicion.de/ley-de-vasos-comunicantes/>)

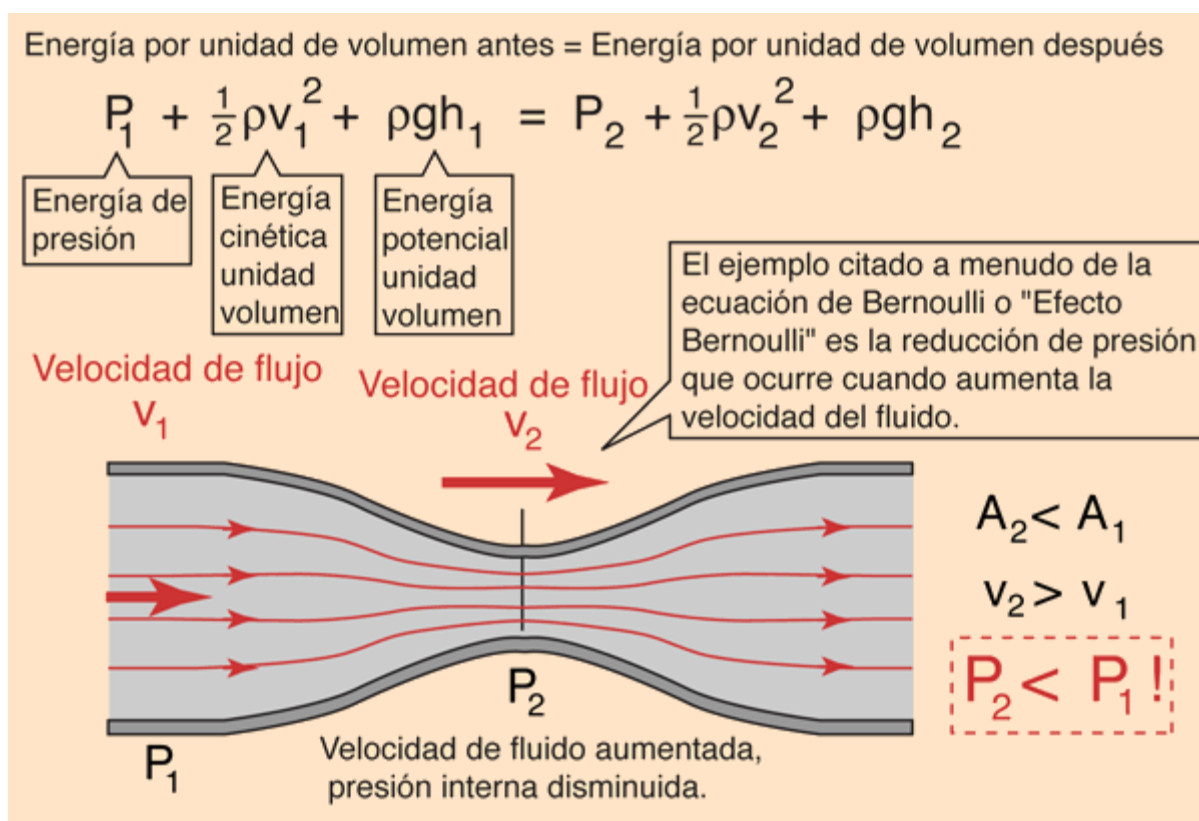


Figura No. 20 Principio de Bernoulli. Tomada de (<http://hyperphysics.phy->

[astr.gsu.edu/hbasees/pber.html](http://astr.gsu.edu/hbasees/pber.html).)

## 2.1.14. VÁLVULAS

Grupo Compas (2013) define:

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos. Las válvulas son unos de los instrumentos de control más esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños van desde una fracción de pulgada hasta 30 ft (9 m) o más de diámetro. Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta más de 20000 lb/in<sup>2</sup> (140 Mpa) y temperaturas desde las criogénicas hasta 1500 °F (815 °C). En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia. (<http://valvula.es/Tipos-de-valvulas/index.php>).

### 2.1.14.1. Características de control

Según Morales Sánchez (2007) se define lo siguiente:

Se refiere a la verificación del flujo que pasa a través de una válvula como una función del viaje del tapón de la válvula y cubre dos casos; el primero, cuando se considera a la válvula como un elemento aislado y a este comportamiento se le conoce como característica inherente, esta dependerá únicamente del diseño de los interiores de la válvula, los principales tipos de características inherentes son (p. 567):

- Abertura rápida

- Lineal
- Parabólica modificada
- Mariposa y bola caracterizada
- Igual porcentaje

El segundo cuando la válvula ha sido instalada, su comportamiento cambiara, de acuerdo con el sistema y al porcentaje de caída de presión de la válvula con respecto a la caída de presión total del sistema. Ahora esta característica se conoce como instalada y es la que definirá el comportamiento de la válvula en el sistema. Si los cambios en la carga son poco apreciables, la selección de la característica de la válvula es de poca importancia debido a que las variaciones en el punto de control serán pequeñas. Pero cuando grandes variaciones en la presión y en la carga ocurran, que es lo más común, se requerirán respuestas rápidas de la válvula, siendo esta respuesta función de la característica inherente de la válvula. (p. 570).

#### **2.1.14.2. Clases de válvulas**

##### **2.1.14.2.1. Válvula de control lineal**

La relación entre la abertura de la válvula y el flujo a caída de presión constante es una línea recta. Son usadas en las siguientes aplicaciones:

- En procesos lentos.
- Cuando más del cuarenta por ciento de la caída de la presión del sistema ocurre en la válvula.
- Cuando la mayoría de los cambios en el proceso sean resultado de carga.
- Como primera alternativa en las aplicaciones de control de nivel.

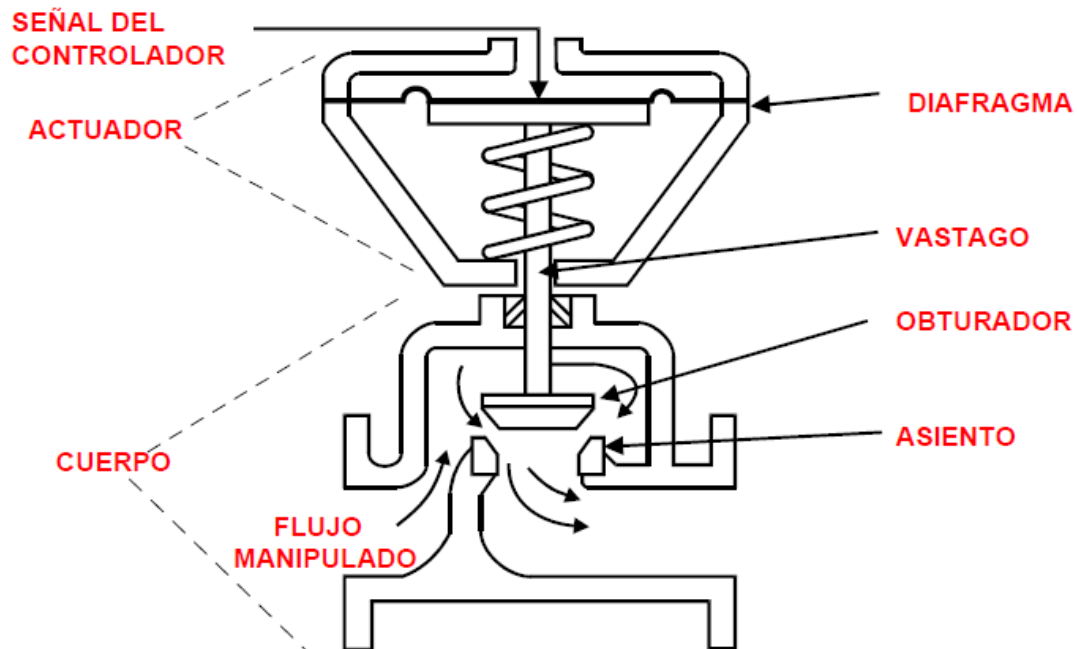


Figura No. 21 Válvulas de control, Tomada de (*Instrumentación básica de procesos industriales*, 2007, p. 565)

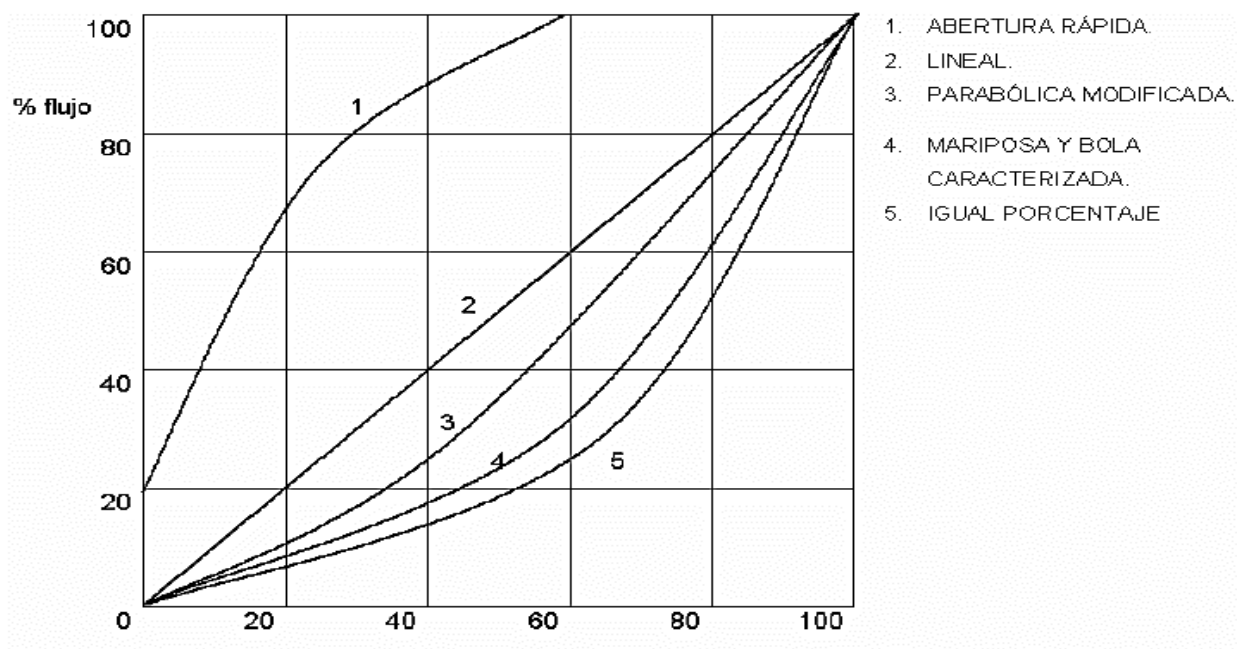
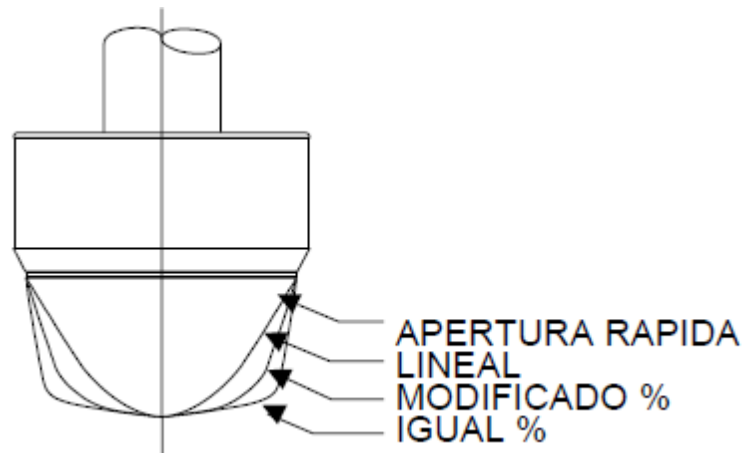


Figura No. 22 Característica inherente de la válvula de control, Tomada de (*Instrumentación básica de procesos industriales*, 2007, p. 568)



*Figura No. 23 Característica de la válvula de control-tapón curvado, Tomada de (Instrumentación básica de procesos industriales, 2007, p. 569)*

#### **2.1.14.2.2 Válvula de control de igual porcentaje**

En este caso la relación es exponencial. La principal propiedad de esta característica es que a igual incremento en el movimiento del vástago de la válvula, producirá un cambio de igual porcentaje en el flujo a caída de presión constante, basado en el flujo antes que el cambio sea hecho. Se utiliza en:

- En procesos rápidos.
- Cuando alta rangeabilidad es requerida.
- Cuando la dinámica del proceso no sea bien conocida.
- En cambiadores de calor cuando un incremento en el flujo del producto, requiere mucho mayor incremento en el medio de enfriamiento o calentamiento.
- Para cierre rápido.
- Como primera alternativa en aplicaciones de control de flujo y presión.

Una válvula con característica de igual porcentaje pierde su característica inherente a medida que esta absorba menos de la caída de presión dinámica del sistema, tendiendo hacia la característica lineal. Esta es aun la mejor elección cuando la dinámica del sistema no es bien conocida, para esto mantiene una característica deseable de control sobre un amplio rango de las caídas de presión dinámicas. Tiene también amplia rangeabilidad, la cual es deseable cuando las cargas del sistema no son bien conocidas.

#### **2.1.14.2.3 Válvula de control de abertura rápida.**

No es común asignarle una definición matemáticas a esta característica. Su comportamiento es aproximadamente lineal en un 25% del viaje del tapón desde que este se encuentra cerrado, y en este intervalo se maneja del 60% al 70% total. Si se usa en este rango se puede considerar como lineal, su uso fuera del mismo es raro excepto en servicio abierto-cerrado. Son usadas en:

- Control de dos posiciones
- Cuando la máxima capacidad de la válvula debe ser obtenida rápidamente.

#### **2.1.15. REGÍMENES DE FLUJO DE FLUIDOS EN TUBERÍAS**

En el campo de estudio de los fluidos (especialmente los líquidos), existen fenómenos que son necesarios analizarlos para comprender el comportamiento cuando estos sufren alteraciones, ya sea por las condiciones en que está el líquido, o por sus accesorios y conexiones donde fluye este líquido. Cuando un líquido circula por las tuberías, se evidencian fenómenos concernientes a la fricción interna por parte de la tubería y sus partículas en movimiento, debido al desplazamiento del líquido.

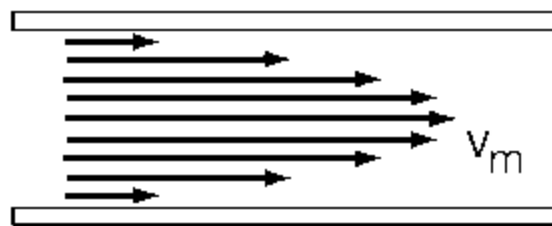


El concepto de flujo laminar y turbulento se basa de acuerdo al comportamiento de las partículas tal como lo define ocwus.us.es (2017):

Cuando un fluido circula por una tubería lo puede hacer en régimen laminar o en régimen turbulento. La diferencia entre estos dos regímenes se encuentra en el comportamiento de las partículas fluidas, que a su vez depende del balance entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas o de rozamiento.(ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%201.Principios%20de%20Hidraulica/tutorial\_05.htm)

### 2.1.15.1. Flujo o régimen laminar

Cuando existe una disminución respecto a la diferencia de velocidad entre las partículas que componen el líquido, se generan fuerzas de fricción que crean rotación entre las partículas en movimiento, esta fuerza generada, que además depende del valor relativo, origina distintos estados de flujo. La rotación de las partículas es insuficiente cuando la fuerza de inercia supera a la que se genera por fricción, de esta manera las partículas del líquido se comportan con trayectos uniformes, a este fenómeno se le denomina “flujo laminar” ya que el desplazamiento de partículas se evidencian por medio de láminas o capas a misma magnitud y sentido.



*Figura No. 24 Flujo o régimen laminar, Tomada de (Número de Reynolds, 2008, p. 4)*

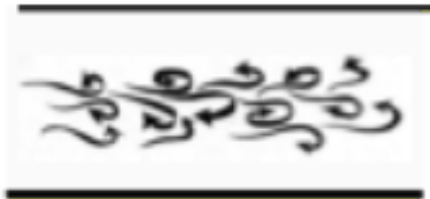
### 2.1.15.2. Flujo o régimen turbulento

A diferencia del comportamiento de las partículas del líquido en el flujo laminar, las partículas en el flujo turbulento rotan notablemente y colisionan entre ellas generando un trayecto errático, difuso y con formación de remolinos.

De acuerdo al concepto de flujo turbulento, fluidos.eia.edu.co (2017) lo caracteriza en:

- Las partículas del fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas.
- La acción de la viscosidad es despreciable.
- Las partículas del fluido poseen energía de rotación apreciable, y se mueven en forma errática chocando unas con otras.
- Al entrar las partículas de fluido a capas de diferente velocidad, su momento lineal aumenta o disminuye, y el de las partículas vecina la hacen en forma contraria.

([http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar\\_turbulento.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm))



*Figura No. 25 Flujo o régimen turbulento, Tomada de (Número de Reynolds, 2008, p. 4)*

### 2.1.15.3. Número de Reynolds

Osborne Reynolds se encargó de analizar estos fenómenos y realizó importantes aportes en el estudio de fluidos, Reynolds determinó una relación que determina si el flujo o régimen es laminar y/o turbulento, concluyendo que si el valor del número de Reynolds es reducido, el flujo es laminar y si este número es considerable, el flujo será turbulento. De esta manera se determina:

Si  $Re < 2000$ , el flujo será laminar.

Si  $Re > 4000$ , el flujo será turbulento.

El número de Reynolds consta de las siguientes variables tal como lo menciona Canut y Guerra (2008):

Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido.

Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye y está dado por:

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

Donde:

$Re$  = Número de Reynolds

$D$  = Diámetro del ducto  $L$

$v$  = Velocidad promedio del líquido  $\frac{L}{T}$

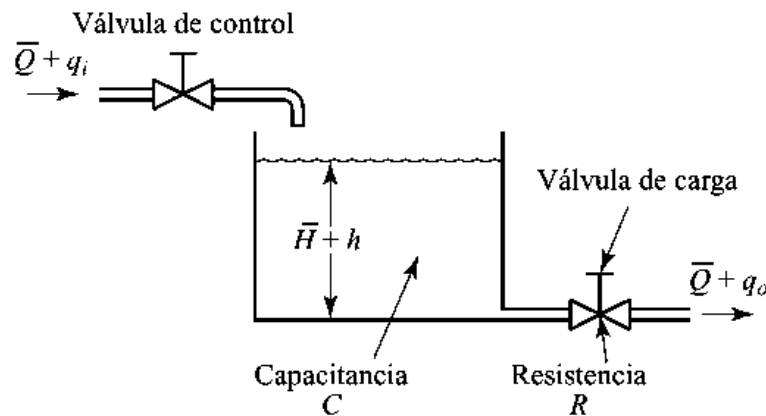
$\rho$  = Densidad del líquido  $\frac{M}{L^3}$

$\mu$  = Viscosidad del líquido  $\frac{M}{L*t}$  (p. 5)

## 2.1.16. MODELADO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS

Cuando se desea estudiar un sistema hidráulico que implica circulación de líquidos, en su mayoría con flujo laminar, hace posible que se represente por medio de ecuaciones diferenciales

lineales. Esto facilita interpretar el comportamiento del sistema hidráulico y relacionar los distintos parámetros y características que lo componen.



*Figura No. 26 Sistema hidráulico de nivel de líquidos, Tomada de (Ingeniería de control Moderna, 2010, p. 102)*

El sistema de la figura 28 es el más común a la hora de realizar su representación por medio de ecuaciones diferenciales lineales, de esta manera permite también hacer su modelamiento como el de un circuito DC, tal como se observará en el apartado 2.1.18.1.

Del sistema de nivel de líquidos de la figura 28, Ogata (2010) indica las variables que lo componen así:

$\bar{Q}$  = Caudal en estado estable (antes de que haya ocurrido un cambio),  $m^3/seg$

$q_i$  = Desviación de la velocidad de entrada de su valor en estado estable,  $m^3/seg$

$q_o$  = Desviación pequeña de la velocidad de salida de su valor en estado estable,  $m^3/seg$

$\bar{H}$  = Altura en estado estable (antes de que haya ocurrido un cambio),  $m$

$h$  = Desviación pequeña de la altura a partir de su valor en estado estable,  $m$  (p. 103)

El sistema al ser lineal, se logra obtener las siguientes ecuaciones correspondientes a su modelamiento, en primera instancia la ecuación referente a la cantidad de almacenamiento en un tanque:

$$C \frac{dh}{dt} = q_i - q_o$$

Posteriormente, la resistencia u restricción que genera la válvula a la salida del sistema, se obtiene la ecuación con la relación entre el cambio en diferencia de nivel  $h$  y el cambio en caudal de salida  $q_o$ :

$$R = \frac{h}{q_o}$$

*Si  $R$  es constante en el sistema:*

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i$$

### **2.1.16.1. Analogía Hidráulica**

Un sistema hidráulico posibilita en cierta medida, hacer analogía respecto a un circuito básico electrónico. Tal como lo menciona Ogata (2010) “Si se introduce el concepto de resistencia y capacitancia para tales sistemas de nivel de líquido, es posible describir en formas simples las características dinámicas de tales sistemas.”(p. 101).

Al hacer la relación de un sistema hidráulico junto con un circuito DC, se puede hacer la semejanza con los distintos componentes del sistema hidráulico, una válvula se asemeja a un componente resistivo, una bomba de agua se relaciona con un fuente alimentación que suministra energía, un condensador que almacena energía se asemeja a un tanque con cierta capacidad de almacenamiento de agua y la tubería se relaciona con el cableado por donde circula el flujo de

corriente; de esta manera resulta útil la enseñanza y comprensión de un sistema electrónico haciendo la analogía de sus componentes.

Como la resistencia en un circuito electrónico se define generalmente como la oposición al flujo de electrones por un conductor, la resistencia en un sistema hidráulico Ogata (2010) la especifica como:

La resistencia R para el flujo de líquido en tal tubo se define como el cambio en la diferencia de nivel (la diferencia entre el nivel de líquido en los dos tanques) necesaria para producir un cambio de una unidad en el caudal. (p. 101)

$$R = \frac{\text{cambio en diferencia de nivel (m)}}{\text{cambio en caudal}}$$

Cuando se desea hacer la relación con la capacitancia de un tanque con agua, Ogata (2010) detalla el concepto como:

La capacitancia C de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en el potencial (altura). (El potencial es la cantidad que indica el nivel de energía del sistema.)

$$C = \frac{\text{cambio en el líquido almacenado, } m^3}{\text{cambio en la altura, } m}$$

Debe señalarse que la capacidad ( $m^3$ ) y la capacitancia ( $m^2$ ) son diferentes. La capacitancia del tanque es igual a su área transversal. Si esta es constante, la capacitancia es constante para cualquier altura. (p. 103)

### 2.1.17. BOMBAS HIDRÁULICAS

Cuando se trabaja una planta de proceso industrial es común encontrar en él una bomba o llamada en algunos casos motobomba, la cual a grosso modo se encarga de transportar un líquido

mediante el incremento de energía del mismo, ya sea en forma de velocidad o presión. Además las especificaciones de la bomba varían de acuerdo al tipo de fluido, altura óptima de trabajo y posicionamiento del motor (ver figura 27).

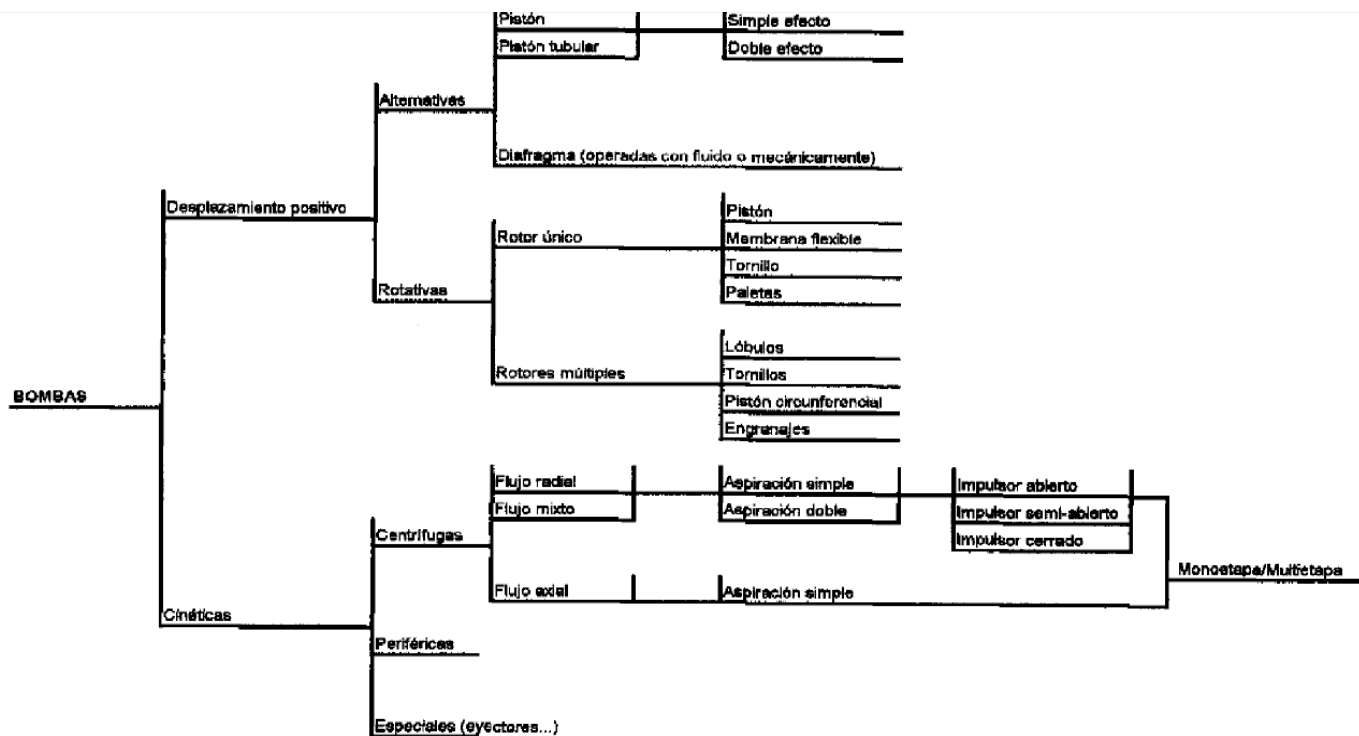


Figura No. 27 Clasificación de bombas hidráulicas, Tomada de

([http://www.mavainsa.com/documentos/6\\_bombas.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/6_bombas.pdf))

### 2.1.17.1 Bomba sumergible

Una bomba sumergible fue la más indicada para emplear en el sistema hidráulico, debido a su facilidad de instalación, características de operación y fácil adquisición. Una bomba sumergible goza de ciertas propiedades cosa que no tienen otros tipos de bombas.

Respecto a la definición y posterior descripción de las bombas sumergibles es importante tener en cuenta lo que Savinobarbera.com resalta:

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y después en

energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación. El funcionamiento es simple: dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. (<http://www.savinobarbera.com/espanol/teoria.html>).

Como aspecto fundamental de las bombas sumergibles se destaca que suministra una potencia de elevación considerable, ya que no pende de la presión de aire externo para elevar el líquido.

### 2.1.17.2 Terminología para la caracterización de una bomba

Respecto a la terminología concerniente a las especificaciones de una bomba, la cual se utilizó en el sistema, Mavainsa.com menciona:

Los términos habituales para caracterizar una bomba son:

- Caudal (Q): Volumen de líquido que maneja una bomba por unidad de tiempo en las condiciones de operación.
- Altura de elevación de una bomba (H): es el trabajo neto cedido a una unidad de peso del fluido bombeado al pasar desde la brida de aspiración a la de impulsión.
- Potencia hidráulica (P): es la potencia cedida por la bomba al fluido expresada habitualmente en C.V.:

$$P(C.V.) = \frac{Q * H * \delta}{75}$$

Donde:

$$Q \left( \frac{l}{seg} \right) = \text{Caudal}$$



$H(mcl)$

— Eficiencia o rendimiento hidráulico ( $\eta$ ): es el coeficiente resultante de dividir la potencia hidráulica por la potencia suministrada al eje de la bomba, por lo que representa el porcentaje de potencia que se transmite al fluido respecto del total suministrado al eje. (p. 6).

### 2.1.18. SENSORES

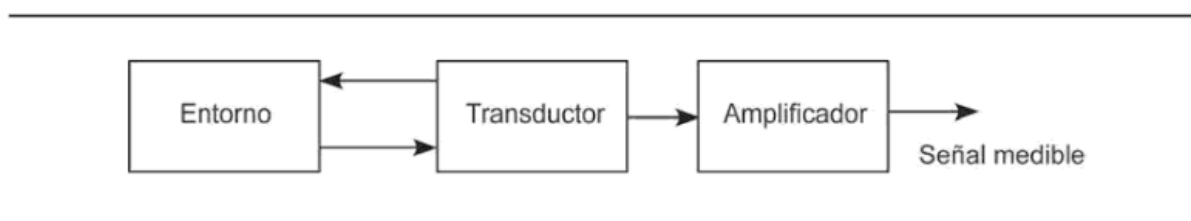
Escolano, F., Cazorla, M., Alfonso, M., Colomina, O., Lozano, M. (2003). Define:

Un sensor es un aparato que mide alguna variable del entorno y que la traduce en una señal medible. A menudo se utiliza la palabra transductor para hacer referencia al sensor.

El transductor es el elemento del sensor que transforma la energía asociada a lo que se desea medir en otra forma de energía. La figura 28 muestra un ejemplo de la configuración de un sensor. El sensor recibe alguna señal que desea medir del entorno.

Previamente a esta medición es posible que el propio sensor interactúe con el entorno emitiendo algún tipo de señal para realizar la medición. Un ejemplo de esto último es la utilización de un sensor de distancia: debemos emitir una señal y esperar a recibir la respuesta para calcular la distancia recorrida por la señal emitida. A este tipo de sensores se les denomina *activos*. Los sensores activos interactúan con el entorno emitiendo algún tipo de energía para realizar la medición. Tienen el problema de que si existen otros sensores del mismo tipo en el mismo entorno, la señal emitida por uno puede afectar y provocar errores en el otro. Además, no todos los entornos responden de la misma forma a la misma señal. En el caso del sensor de ultrasonidos, distintos materiales suelen tener un índice de amortiguación del sonido distinto, lo que provoca mediciones de distancia

distintas. Por otro lado, tenemos los sensores *pasivos*, que no emiten y se limitan a medir la energía que reciben. Un sensor de temperatura sería un ejemplo de sensor pasivo. Este tipo de sensor lleva asociado un error superior, debido a que la señal a medir es mucho más débil. (p. 313)

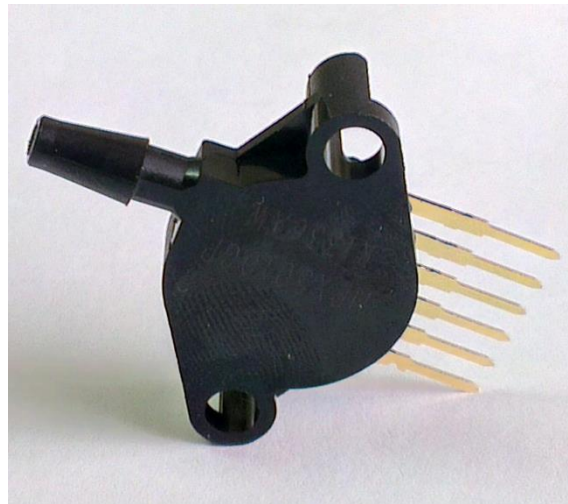


*Figura No. 28 Esquema de sensor, Tomada de (Inteligencia Artificial Modelos, Técnicas y Áreas de Aplicación., 2003, p. 313)*

#### **2.1.18.1. Sensor De Presión**

A la hora de instrumentar la medida de presión, hay en el mercado gran variedad de sensores de presión con diversas referencias y características de operación; un parámetro importante para seleccionar los sensores adecuados concernientes al proyecto, es el de tener en cuenta los rangos de presión que se ejercen tanto a la salida de la motobomba como en los recipientes A y B para medir nivel, ya que con esto se garantiza que la medida por parte del sensor se ajuste a los rangos de operación. Una vez realizado el análisis y haber determinado la presión de la motobomba que se puede evidenciar en el capítulo 4, los sensores de presión que mejor se acoplan al sistema por sus características y tipo de encapsulado, en primera instancia el MPX2050 (para la salida de presión de la motobomba), con señal de salida entre el rango de 1 mV a los 40 mV (sin acondicionamiento) y en segunda instancia el MPX5010 (para la medición de nivel de los recipientes A y B) el cual posee señal de salida acondicionada en un rango de 0.2V a 4.7V, ambos diseñados por el fabricante Freescale Semiconductor.

Este tipo de sensores caracterizados por proporcionar una señal lineal (en voltios), de acuerdo a una relación proporcional a la presión a que se le ejercen, de 0 a 7.25 PSI para el MPX2050 y de 0 a 1.45 PSI para el MPX5010, están fundamentados en un transductor piezoresistivo y monolítico de silicio, están diseñados para una amplia gama de aplicaciones que de acuerdo a la hoja de especificaciones por parte del fabricante son: uso hospitalario, sistemas respiratorios, control de procesos, nivel de agua para lavadoras, medición tanto de nivel como presión para líquidos; un aspecto relevante es su operación, la cual está centrada para Microcontroladores con entradas analógicas y digitales, el cual resulta importante para el desarrollo del proyecto.

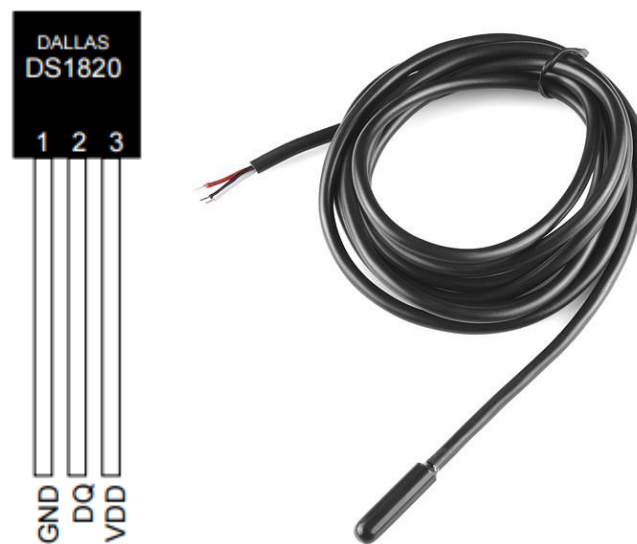


*Figura 29. Sensor de presión con encapsulado 867B-04, Tomada de (<http://www.nxp.com/>)*

#### **2.1.18.2. Sensor De Temperatura**

Un aspecto importante para la medición de las variables fundamentales del agua es la medición de la temperatura, ya que está estrechamente ligada a las propiedades de la presión y densidad por parte del líquido. Esto hace que sea importante conocer el comportamiento de la temperatura del líquido que es procesado en el sistema.

Por practicidad se emplea el sensor de temperatura DS18B20 de DALLAS SEMICONDUCTOR en el reservorio principal del sistema, ya que este instrumento facilita la medición debido a que el reservorio siempre contendrá agua (por requerimiento de la motobomba), y que además el calentador de agua para su óptimo funcionamiento, también exige de cierto volumen de agua. El sensor de temperatura DS18B20 es el más indicado para emplear en el proyecto, esto es a que una de sus ventajas es que se ofrece en el mercado de tipo sonda impermeable, facilitando que el mismo pueda ser sumergido en el agua sin correr ningún riesgo de deterioro o daño.



*Figura 30. Sensor de temperatura DS18B20. Tomada de <https://cdn.sparkfun.com/>*

Características de operación del sensor digital de temperatura:

- Asignación de pines:
  - 1-Puesta a tierra.
  - 2-Datos de entrada y salida.
  - 3-Voltaje de alimentación.
- Voltaje de operación de 3 a 5.5V.
- Rango de temperatura entre -55°C a 125°C.

- Interfaz de comunicación 1-Wire
- Precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Resolución programable de 9 a 12 bits.

Respecto a sus características de operación del sensor, un aspecto relevante es que es un sensor digital con una resolución programable de 9 a 12 bits y su señal leída no se degrada por su cableado, a su vez, no requiere de componentes externos (como otros sensores si lo requieren) salvo una resistencia con configuración pull-up de  $4.7\text{k}\Omega$  para la correcta transmisión de datos, este sensor opera con el protocolo 1-Wire posibilitando conectar más sensores en la misma línea de conexión (como límite 32 sensores).

### **2.1.18.3. Sensor De Caudal**

Cuando se desea conocer la cantidad de agua que fluye por una tubería, es imprescindible emplear el sensor de caudal YF-S201 de efecto Hall, este sensor tiene la ventaja de que está fabricado por materiales en plástico, lo cual lo hace duradero al contacto con el agua. El sensor internamente está compuesto por un rotor junto con un sensor de efecto Hall y su conexión no requiere de componentes adicionales, lo cual hace que su uso se facilite (Ver figura 31).

Para el correcto empleo del sensor y la obtención de la medida de caudal es importante tener en cuenta las características que se mencionan a continuación

Características del sensor de caudal YF-S201:

- Tipo de Sensor: Efecto Hall
- Voltaje Nominal: 5 to 18V DC (Voltaje Mínimo Requerido 4.5V)
- Máxima Corriente de operación: 15mA @ 5V

- Voltaje de Salida: 5V TTL
- Velocidad de Flujo: 1 a 30 Litros/Minuto
- Rango de Temperatura: -25 a +80°C
- Rango de Humedad: 35%-80% RH
- Precisión:  $\pm 10\%$
- Máxima Presión de Agua: 2.0 MPa
- Salida del Ciclo de Trabajo: 50%  $\pm 10\%$
- Pulsos por Litro: 450
- Durabilidad: Mínimo 300,000 ciclos
- Largo del Cable: 15cm
- Conectores nominales tubería de 1/2"
- Diámetro externo de 0.78"
- Rosca de 1/2"
- Tamaño: 2.5" x 1.4" x 1.4"

#### **2.1.18.3.1. Funcionamiento Del Sensor YF-S201**

El sensor YF-S201 obtiene la medida de caudal por medio del efecto Hall, ya que este sensor tiene dos roscas para tubería de  $1/2$ " donde una de ellas es para la entrada del líquido y la otra para la salida del mismo (según lo indique la flecha plasmada). Cuando el líquido circula por el caudalímetro hace girar el rotor, este tiene un sensor magnético de efecto Hall el cual emite un impulso eléctrico por cada revolución del rotor, logrando que se genere una señal de pulsos proporcional a la velocidad del flujo del líquido. Los pulsos generados por este sensor según el fabricante constan aproximadamente de 2,25 mililitros por cada pulso.



*Figura 31. Sensor de caudal YF-S201, Tomada de  
([miarduinounotieneunblog.blogspot.com.co/2016/04/caudalimetro-con-sensor-de-flujo-yf.html](http://miarduinounotieneunblog.blogspot.com.co/2016/04/caudalimetro-con-sensor-de-flujo-yf.html))*



*Figura 32. Composición interna del sensor. Tomada de  
(<http://www.electroschematics.com/12145/working-with-water-flow-sensors-arduino>)*

Respecto a la precisión del sensor de caudal, [chips.mecatronicum.com](http://chips.mecatronicum.com) (2017) aclara que:

Tenga en cuenta que esto no es un sensor de precisión, y la frecuencia del pulso varía un poco dependiendo de la velocidad de flujo, presión del fluido y la orientación del sensor.

Si se necesita más del 10% de precisión se tendrá que hacer la calibración adecuada.  
(<http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/>).

La salida de pulsos es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal. El factor de conversión de frecuencia (Hz) a caudal (L/min) varía entre modelos y depende de la presión, densidad e incluso del mismo caudal.

Para el caso del sensor de ½” el factor de conversión promedio proporcionado por el fabricante es:

$$f(\text{Hz}) = 7.5xQ(\text{L}/\text{min})$$

Se llamara K al factor de conversión, siendo K=7.5 para el sensor de ½”, K=5.5 para el sensor de ¾” y 3.5 para el sensor de 1”, trabajar con dichos valores no garantiza precisión, pero pueden servir para aplicaciones simples, si se necesita mayor exactitud se requiere calibrar y calcular dicho factor.

### **2.1.19. MOTORES**

Navarrete (2003) define:

Un motor eléctrico es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, es decir, en movimiento. Los motores eléctricos forman parte indispensable de aparatos electrodomésticos tan corrientes como el aspirador, la lavadora o la nevera, pero también son maquina industriales que producen fuerza motriz de una manera más limpia y silenciosa que los motores de combustión interna. Dado que realizan una labor opuesta a la de los generadores, los motores eléctricos tienen una gran semejanza con estos. (p.36)



### 2.1.19.1. Motor Paso A Paso

Lajara, J., & Pelegry, J (2011) define:

Un motor paso a paso es un conversor electromecánico que transforma la energía eléctrica en mecánica. Convierte un tren de impulsos eléctricos en un movimiento angular. En ellos su eje gira un determinado Angulo, también llamado (paso), que depende de los impulsos eléctricos que le sean aplicados. El paso determinara la precisión del motor, así para un paso pequeño el motor podrá girar con mayor precisión, pero necesitará más pasos para dar una vuelta completa. El paso de los motores suele variar desde  $90^\circ$  a ángulos menores de  $1^\circ$ .

Los motores paso a paso de imán permanente son los más comunes. El rotor es un imán permanente y el estator contiene unos polos salientes en forma de dientes sobre los que van las bobinas. El modo en que están conectadas las bobinas determina el tipo de motor paso a paso:

- Bipolar: sobre las bobinas del estator se puede hacer pasar una corriente eléctrica que creara un campo magnético. Este campo magnético hará que el rotor gire hasta encontrar una posición de equilibrio. Si en ese momento las corrientes cambian, el campo magnético también cambia y el rotor deberá girar otra vez.
- Unipolar: las bobinas del estator están divididas en dos debido a que su punto central esta puesta a referencia. La corriente puede circular por una de las dos partes de la bobina dependiendo de un conmutador. De esta forma, la posición del conmutador determina el sentido de la corriente en la bobina y esta, a su vez, de termina la polaridad del campo magnético generado y el sentido del giro.

El control de los motores se reduce a activar y desactivar las bobinas para hacer que el rotor gire. La activación y desactivación se realiza a través de un driver que consta de interruptores: cuando los interruptores se cierran, circula una corriente por la bobina que provoca un campo magnético que atrae o repele el imán del rotor. En la figura 33 puede verse una secuencia de la activación de bobinas para hacer girar el rotor en sentido anti horario. (p. 209)

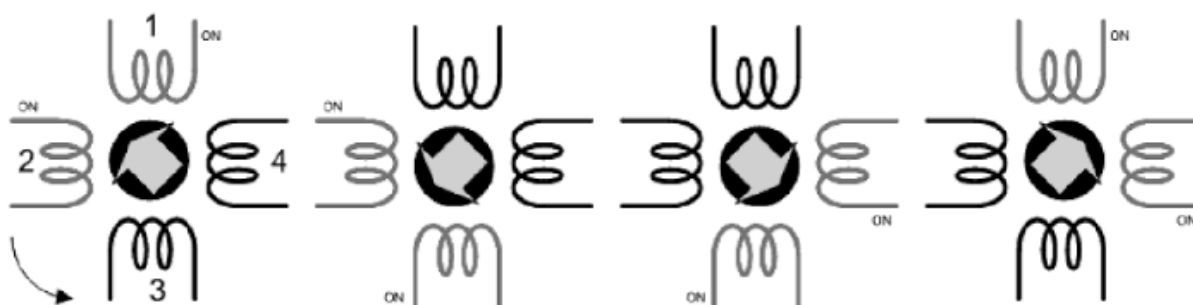


Figura No. 33 Giro anti horario de un motor paso a paso, Tomada de (Lajara, J., & Pelegry, J., 2011, p.210)

En la secuencia de paso completo (*full step*) el rotor gira un paso por cada pulso; es la secuencia representada en la figura 33 y en la tabla 34. Para girar en sentido horario se sigue la secuencia (a) y para sentido anti horario (b). En la secuencia de medio paso (*half step*). Como su nombre indica, el motor avanza medio paso por cada pulso, se basa en la activación de una y dos bobinas, como puede verse en la tabla 34(b).

### 2.1.20. MICROCONTROLADOR ATMEGA328P

Los Microcontroladores empleados para movimiento de los actuadores, toma y procesamiento de señales por parte de los sensores, fue el Microcontrolador de la firma Atmel

ATmega328P, el Microcontrolador tiene un costo asequible y se caracteriza por ser empleado en las plataformas Arduino UNO.

El Microcontrolador ATmega328P está fundamentado en la arquitectura AVR (ver figura 35), la cual está constituida en un Microcontrolador tipo RISC (del inglés *Reduced Instruction Set Computer*).

| Paso | S1 (a) | S2 (a) | S3 (a) | S4 (a) | S1 (b) | S2 (b) | S3 (b) | S4 (b) |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1    | ON     |        |        | ON     | ON     | ON     |        |        |
| 2    |        |        | ON     | ON     |        | ON     | ON     |        |
| 3    |        | ON     | ON     |        |        |        | ON     | ON     |
| 4    | ON     | ON     |        |        | ON     |        |        | ON     |
| 1    | ON     |        |        | ON     | ON     | ON     |        |        |

Figura No. 34(a) Secuencia de paso entero giro horario (a) y anti horario (b), tomada de

(Lajara, J., & Pelegry, J, 2011, p.210)

| Paso | S1 (a) | S2 (a) | S3 (a) | S4 (a) | S1 (b) | S2 (b) | S3 (b) | S4 (b) |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1    | ON     |        |        | ON     | ON     | ON     |        |        |
| 2    |        |        |        | ON     |        | ON     |        |        |
| 3    |        |        | ON     | ON     |        | ON     | ON     |        |
| 4    |        |        | ON     |        |        |        | ON     |        |
| 5    |        | ON     | ON     |        |        |        | ON     | ON     |
| 6    |        | ON     |        |        |        |        |        | ON     |
| 7    | ON     | ON     |        |        | ON     |        |        | ON     |
| 8    | ON     |        |        |        | ON     |        |        |        |
| 1    | ON     |        |        | ON     | ON     | ON     |        |        |

Figura No. 34(b) Secuencia de medio paso para giro horario (a) y anti horario (b), tomada de

(Lajara, J., & Pelegry, J, 2011, p.210)

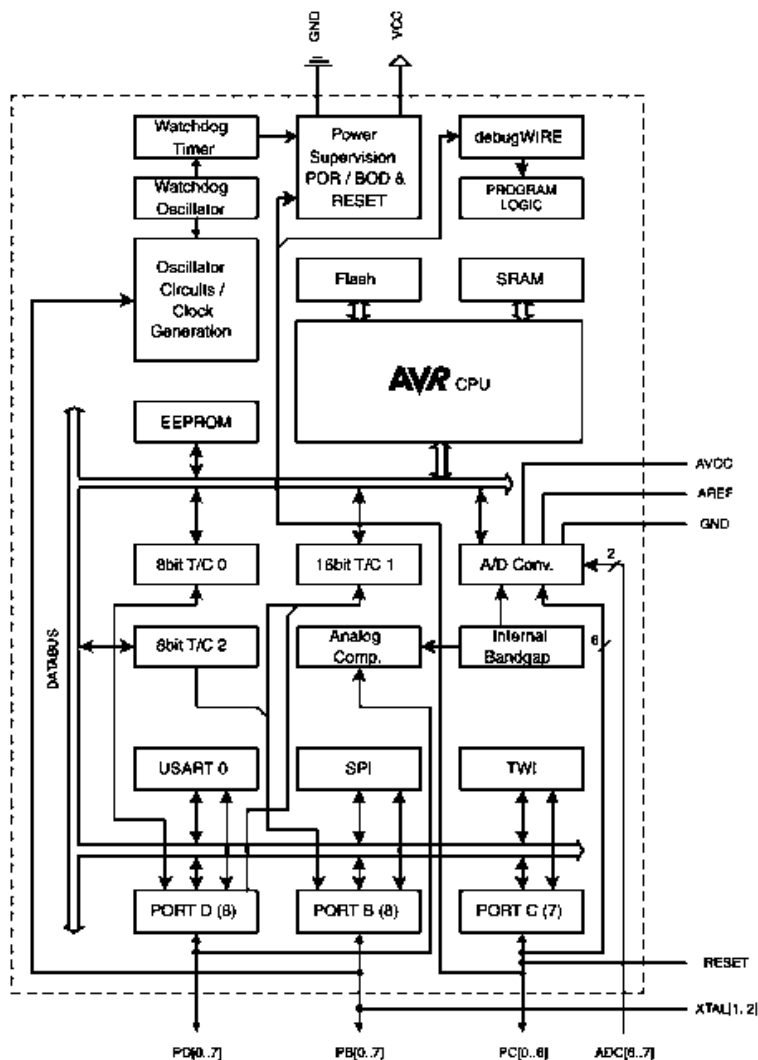


Figura No. 35 Diagrama en bloques de las funcionalidades del ATmega328P, tomada de [\(www.atmel.com/images/\)](http://www.atmel.com/images/)

A grosso modo, sus propiedades constan de una memoria EEPROM de 1KB y con 2KB de memoria SRAM, se caracteriza por emplear 23 líneas tanto de entrada como de salida para uso general, para el convertor analógico/digital opera con 6 canales con resolución de 10 bit cada uno, y para el óptimo funcionamiento del dispositivo, requiere de un voltaje de operación de 1.8V a 5.5V. En la figura 36 se pueden observar sus especificaciones técnicas del Microcontrolador.

|                        |  |
|------------------------|--|
| Microcontroller        | ATmega328P   |
| Operating Voltage      | 5V   |
| Digital I/O Pins       | 14 (of which 6 provide PWM output)                       |
| PWM Digital I/O Pins   | 6  |
| Analog Input Pins      | 6  |
| DC Current per I/O Pin | 20 mA  |
| Flash Memory           | 32 KB (ATmega328P)<br>of which 0.5 KB used by bootloader |
| SRAM                   | 2 KB (ATmega328P)  |
| EEPROM                 | 1 KB (ATmega328P)  |
| Clock Speed            | 16 MHz   |

*Figura No. 36 Especificaciones del ATmega328P, tomada de (www.electgpl.com)*

#### **2.1.20.1. Aplicación y funcionalidad**

La elección del Microcontrolador se fundamentó por su fácil adquisición y la manera en cómo se programó, ya que brinda la posibilidad de compilarlo en la board Arduino UNO, de tal forma que su manejo sea más práctico a la hora de operarlo. Es importante recalcar que su lenguaje para programación está basado en C++ (cuando se emplea el IDE Arduino), y la configuración de los pines, tal como se puede contemplar en la figura 37, debe ser tenida en cuenta si se programa por medio de la board Arduino o sin ella (modo externo), si el usuario opta por programarlo externamente es importante adicionar componentes (condensadores, oscilador y resistencias), los cuales deben ir conectados al Microcontrolador junto con una protoboard.

#### **2.1.21. Linealización**

Aristizábal, Restrepo & Ramírez (2010) define:

Generalmente el modelo que representa un fenómeno natural no es una función lineal (es decir, su grafica no es una línea recta). Sin embargo como los modelos lineales son más

fáciles de analizar, se puede tratar de convertir las funciones a la forma lineal, lo cual en muchas situaciones es posible. A este procedimiento se le denomina linealización. (p. 2)

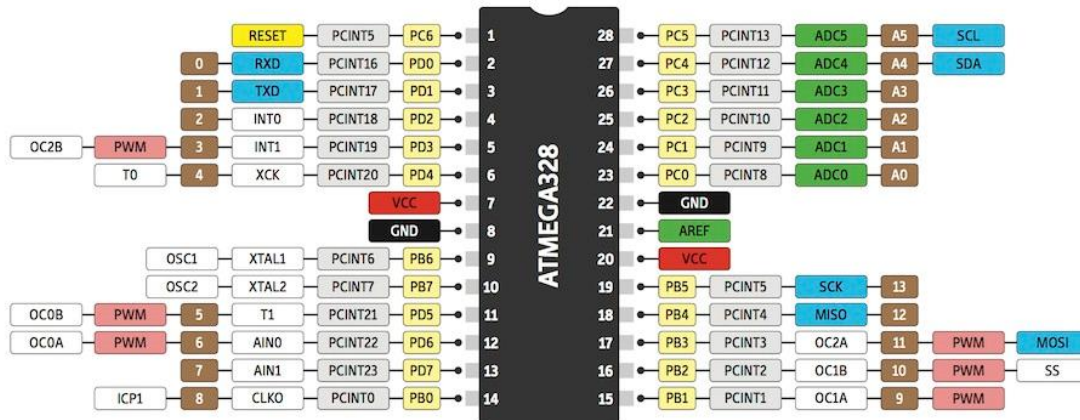


Figura No. 37 Configuración de pines, tomada de ([www.electgpl.com](http://www.electgpl.com))

### 2.1.21.1. Linealización por logaritmos

Toda esta información la puede encontrar en Aristizábal, Restrepo & Ramírez (2010).

Entre los modelos que permiten Linealización mediante la logaritmicación están:

- La función potencial

La función  $y = bx^a$

Se linealiza a través de los logaritmos,

$$\log y = a \log x + \log b$$

Cambiando variables,

$$\log y \equiv y' \quad \log x \equiv x' \quad \log b \equiv b'$$

$$y' = ax' + b'$$

Es decir, si en la función potencial se grafica  $\log y$  vs  $\log x$  se obtiene la ecuación de una línea recta.

- La función exponencial

La función  $y = be^{ax}$

Se linealiza a través de los logaritmos,

$$\text{Ln } y = ax + \text{Ln } b$$

Cambiando variables

$$\text{Ln } y \equiv y' \quad \text{Ln } b \equiv b'$$

Se obtiene,

$$y' = ax + b'$$

Es decir, si en la función potencial se grafica Ln y vs x se obtiene la ecuación de una línea recta.

## **2.2. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

En lo que concierne al presente trabajo de grado se hallaron diversos proyectos, los cuales están relacionados específicamente con los sistemas que emplean las variables fundamentales, y la necesidad de estudiarlos en un campo específico, lo cual hace que estos se sean pertinentes y afines a los objetivos formulados, como consecuencia se hacen fundamentales para el desarrollo del proyecto de grado.

### **2.2.1. Diseño e implementación de medios de laboratorio para contribuir al proceso de enseñanza aprendizaje en el área de instrumentación industrial.**

M. Moreira B., M. Jovel O., R. Jiménez C., y V. Moncada B., 2009 Universidad Nacional de Ingeniería, Managua Nicaragua.

Consiste en el desarrollo de una planta piloto con propósitos meramente académicos, donde la planta piloto se encarga de implementar el proceso de llenado, calentado, presurización, descompresión y descarga de un tanque con agua, de forma automática. Un aspecto relevante de este proyecto es que se focaliza en facilitar la adquisición de conocimientos en el estudiante sobre la instrumentación industrial y todo lo que está allí inmerso, a su vez lo ahonda con las metodologías, normas y el control de procesos.

### **2.2.2. Modelo didáctico para el aprendizaje significativo en los sistemas automáticos de control**

Alí Carrillo. Hau Moy, 2009. Universidad Rafael Bellosó Chacín de Venezuela.

En esta investigación se puede observar que el desarrollo está orientado y focalizado en desarrollar un modelo didáctico para el aprendizaje significativo en los sistemas automáticos de control para áreas afines a la misma. La investigación se caracteriza por aplicar un diseño experimental, con sus correspondientes requerimientos, a estudiantes los cuales adelantan la fase profesional de la facultad de ingeniería de la Universidad experimental Rafael María Baralat (24 estudiantes) y de la Universidad Nacional experimental de fuerzas Armadas (24 estudiantes). La investigación tiene una perspectiva y tendencia pedagógica muy consolidada, ya que se enfoca fundamentalmente en enmarcar una perspectiva epistemológica de carácter cuantitativo, además se fundamenta en realizar cuestionarios a los protagonistas del modelo didáctico para acompañar dicho proceso de aplicación. Finalmente, busca que dicho modelo didáctico se encargue sustancialmente, en brindar al docente y estudiantes una vía clara y definida de la enseñanza, por medio del desarrollo de las actividades de tal manera que se comprendan y apliquen los contenidos abordados en el área.



### **2.2.3. Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal de agua.**

Ramírez José L. Londoño Carlos M. 2007. Instituto Tecnológico Metropolitano.

Este proyecto resulta relevante para el proyecto, y esto se debe a que se focaliza en el rediseño en la medición y control del nivel y caudal de agua de un prototipo que lleva ya tiempo de estar elaborado, resulta importante que el proyecto incluya la teoría y las diversas estrategias de control para las variables ya definidas y que da la posibilidad de analizar y comparar los resultados de dichas mediciones.

### **2.2.4. Diseño, construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden.**

Gil Óscar F. Robayo David. 2011 Universidad Tecnológica de Pereira

Un proyecto enfatizado en la implementación de un sistema de control, hace énfasis en el tratamiento e instrumentación de fluidos. Como aspecto esencial, se dio importancia a la medición de nivel por medio del método indirecto de la presión hidrostática, el cual mencionaba ciertas recomendaciones a la hora de obtener tal medición, y la manera en cómo deben ir conectadas las boquillas de los sensores y el empleo de tanques descubiertos.

### **2.2.5. Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control del acuario del museo de ciencias biológicas de la escuela politécnica nacional.**

Caicedo Homero A. Obando Sebastián D. 2011 Escuela politécnica Nacional.

Este proyecto se tuvo en cuenta debido a que trabaja con las variables temperatura y presión del agua de un acuario, la importancia radicó en la manera en cómo se midió la temperatura, y el

método en cómo se amplificó la señal de salida por parte del sensor de presión con el amplificador de instrumentación.

## **CAPITULO 3. METODOLOGÍA.**

### **3.1 DETERMINACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO**

A la hora de determinar el diseño de la estructura, junto con los componentes del sistema hidráulico, se hizo especial énfasis en los objetivos específicos planteados de este proyecto, al plantear que se debe definir el esquema del sistema de acuerdo a la exigencias de diseño (específicamente: movilidad, peso, durabilidad, dimensiones y seguridad industrial), esto hizo que los componentes y accesorios que componen el sistema tengan la facilidad de transportar, utilizar y/o maniobrar.

#### **3.1.1 Relación diseño - electrobomba**

Otro aspecto a tener en cuenta es la relación de las características de la electrobomba con el diseño del sistema, inicialmente si la electrobomba era periférica o sumergible, y a su vez características como el flujo y altura óptima junto con su diámetro a la salida de la bomba.

Al momento de adquirir la electrobomba del sistema se tuvieron en cuenta varios aspectos:

- Dimensiones
- Diámetro de salida
- Peso
- Altura y flujo óptimo

En primera instancia se planeó adquirir una electrobomba periférica debido a su fácil adquisición y variedad en tiendas hidráulicas, pero al notar que sus características de operación sobrepasan los requerimientos y no se acoplaban parcialmente a las exigencias de diseño se optó por una bomba sumergible.

### **3.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO**

La bomba sumergible de marca Evans AQUA45W se eligió por sus características de trabajo y movilidad, se adapta a las exigencias de diseño de la planta y ofrece confiabilidad. Su presión máxima (20 Kpa), peso (1.1 Kg), flujo óptimo (15.00 LPM), altura óptima (2.00 mts), temperatura máxima permitida del líquido (40°C) y sus dimensiones (11.00 x 8.00 x 11.00 cm), hacen de este elemento, una herramienta útil y equiparable con una bomba periférica. Se hace hincapié respecto al mercado de dichos elementos, ya que las bombas periféricas trabajan con rangos de presiones muy superiores y están orientadas al contexto industrial, ninguna se ajusta al diseño de la planta, que pretende dar una aproximación del control de variables a nivel industrial.

Quiénes se encargan de distribuir el agua por todo el sistema son las mangueras, cuyo diámetro es de media pulgada, de calibre rígido para evitar obstrucciones que alteren el censado de la presión y demás medidas, para que los datos no estén relacionados en su mayoría con torceduras o estrangulamientos; sin embargo el mismo material ofrece una resistencia ínfima inherente. Respecto al diámetro, su elección está sujeta a las características de la bomba sumergible cuya boquilla tiene un diámetro de dicha medida, además en el mercado es muy fácil encontrar elementos que poseen dicha dimensión, lo cual facilita el trabajo de ensamblaje.

Los tanques son de material de plástico y son cilíndricos, el recipiente principal que es donde está alojada la bomba sumergible y la resistencia calorífica, posee una capacidad de 8 litros de agua para distribuirle a todo el sistema, y cumplir con la condición de entrada constante de agua a la bomba sumergible (debe tener un suministro constante para evitar averías mientras está en funcionamiento). Los otros dos tanques restantes, tienen una capacidad de 2 litros cada uno, están unidos por medio de una válvula que regula el caudal y permite tener vasos comunicantes. Su función es permitir trabajar lo concerniente al nivel de líquido.

El sensor de caudal YF-S201 de Efecto hall, cumple con las exigencias de presión y caudal de la bomba sumergible, tiene capacidad de tasa de flujo de 1 – 30 L/minuto y puede trabajar a una presión máxima de 2 Mpa. Emite pulsos que varían según la frecuencia a la que se mueva el rotor que hay en su interior, esta salida es digital. Una desventaja es que a menudo exige una calibración, ya que no es un elemento 100% preciso.

Los sensores de presión absoluta son usados para medir la presión de entrada en el sistema, y el nivel del líquido en cada uno de los recipientes de capacidad 2 litros. La referencia MPX2050GP para presiones máximas de 50 Kpa (7.25 psi) se usa para medir la presión de entrada en la válvula Numero 1 que se encarga de regular caudal que ingresa al tanque A; la presión de entrada está dentro del rango permitido de trabajo del sensor de presión; conviene usar sensores de presión que soporten al menos el doble de la presión máxima del sistema. La referencia MPX5010GP para presiones máximas de 10Kpa (1.45 psi), son usados para medir el nivel del líquido en los tanques A y B.

De todas las válvulas que existen en el mercado se hizo la elección de una referencia, por cuestiones de economía, respuesta que tiende a ser lineal, ideal para altas presiones, y buen control de caudal, se eligieron las válvulas de regulación de caudal marca GRIVAL, son plásticas y poseen un diámetro de media pulgada, la cantidad de vueltas de apertura y cerrado varía de válvula a válvula, generalmente giran de 0 - 800 grados. No requieren demasiado torque para moverlas, son suaves y poseen un obturador adecuado para trabajar en la linealidad. Se añadió una válvula de bola que tiene como fin, la calibración del sensor de caudal, no cumple con las condiciones de regulación ni está diseñado para tal propósito.

### **3.3. ESTRUCTURA**

Con el fin de cumplir con el objetivo No 1 del presente trabajo de grado, se hizo necesario elegir un material para la estructura que brinde durabilidad y sea ligero. Después de muchas consultas con expertos en el trabajo de metales y por concepto de los mismos, el material a usar fue *Acero cold rolled* de media pulgada cuadrado. Este acero ofrece resistencia y cumple con las exigencias propuestas. Para combatir el óxido producido por el contacto con agua, se le aplicó pintura electrostática, dándole belleza al metal y además no conduce electricidad, lo cual es importante para evitar corto circuitos que puedan averiar el sistema. Todo la estructura esta soldada.

#### **3.3.1. Dimensiones de la estructura**

El diseño de la estructura se pensó para ofrecer estabilidad y movilidad, además la distribución de los elementos que interactúan entre sí, son dependientes del tipo de bomba a usar, lo que requiere de una adecuada distribución del todo el sistema procurando no ser excesivo con

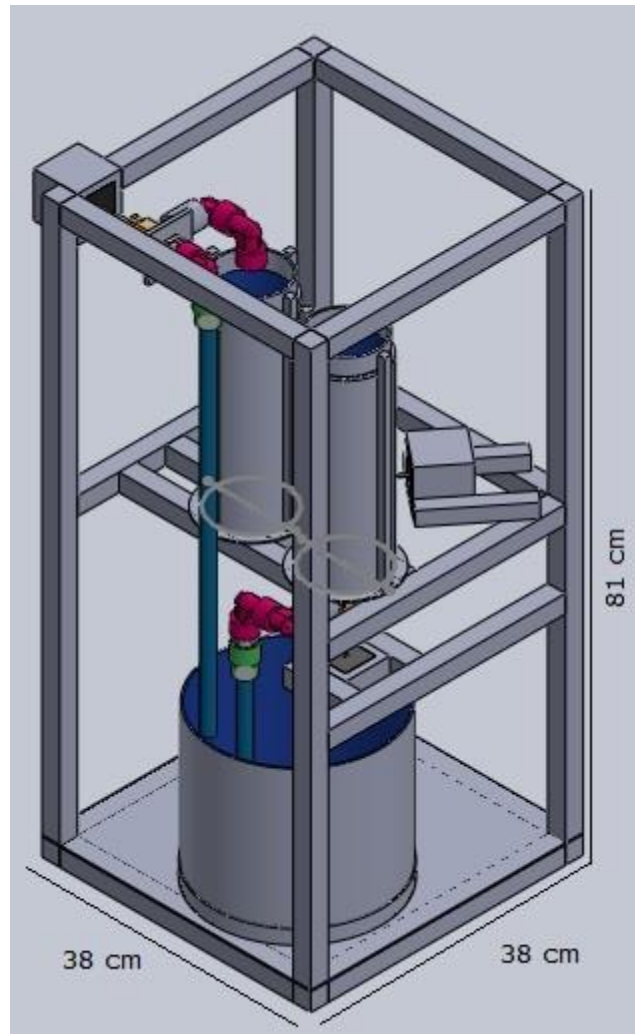
el peso. La estructura es robusta y confiable. La distribución de cada uno de los componentes se hizo de acuerdo a un equilibrio del todo. El interior de cada varilla cuadrada es hueco, toda la estructura esta soldada, posee tres compartimentos uno por cada motor para evitar que rote sobre su eje pudiendo ser graduado con unos tornillos de sujeción que le permiten moverse, ya que el vástago de cada válvula oscila haciendo que la manivela no posea una posición fija respecto a su eje de rotación. Para la válvula No 1 se hizo una abrazadera para mantenerla firme y que el torque del motor no la cambie de su posición. Cada uno de los tanques posee unas bases para mantenerlos quietos y de esta forma evitar el derrame del líquido. El solo peso de la estructura es de 2 kilos.

Se usó el software *Solidworks* para tener una aproximación tridimensional de lo que sería la estructura. Por medio de este, fue posible realizar una propuesta de diseño que se ajustara a lo requerido, ofreciendo las medidas de cada uno de los elementos del mueble y realizando las modificaciones pertinentes en tiempo real. La persona que se encargó del ensamblaje en físico, le resulto muy fácil realizar el armazón, pues el software da medidas precisas y no se hizo necesario imprimir imágenes. Sus medidas son: (38.00 x 81.00 x 38.00 cm). En la figura 38 se puede observar el modelo finalizado *Solidworks*.

### **3.4. ACTUADORES**

La elección del actuador estuvo inmersa en dificultades por cuestiones de torque y control de giro, en un principio se había propuesto usar servomotores que son los más recomendados para temas relacionados con robótica, control por ángulo y son livianos, pero tienen un limitante respecto al giro del eje, pues solo pueden llegar a los 180 grados. Hay que recordar que las

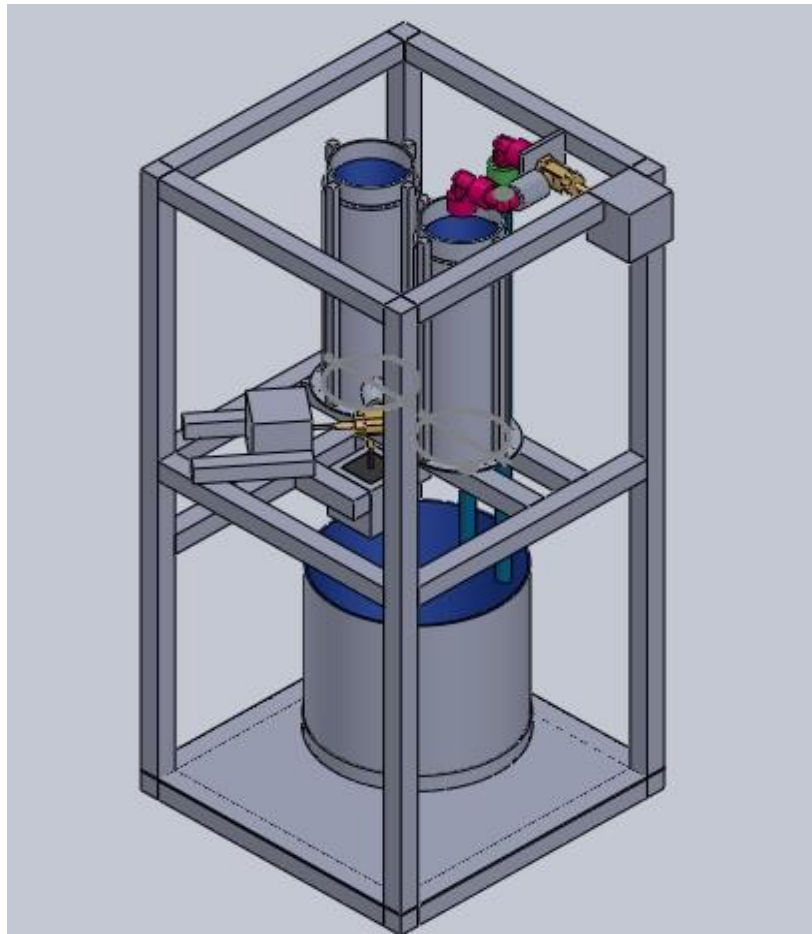
válvulas de regulación de caudal giran en un rango de  $0^{\circ}$  a  $800^{\circ}$  grados, por lo cual estos motores no podían suplir dicha necesidad.



*Figura No.38 Perfil de la planta hecho en Solidworks.*

Se intentó trucar o modificar internamente el motor para que su giro sea continuo, pero perdía el control por ángulo, lo que conlleva a la incertidumbre pues no se podía determinar la posición a la que estaba el eje después de apagar y prender el motor y constantemente se desfasa. Para solucionar esto, se optó por usar el motor bipolar paso a paso que ofrece un funcionamiento

similar pero no de la misma precisión que lo hace un servomotor ni en tamaño y peso, sin embargo por su fácil control, buen torque y poco cableado, fue el elegido para cumplir la función de controlar el giro de la válvula de regulación de caudal.



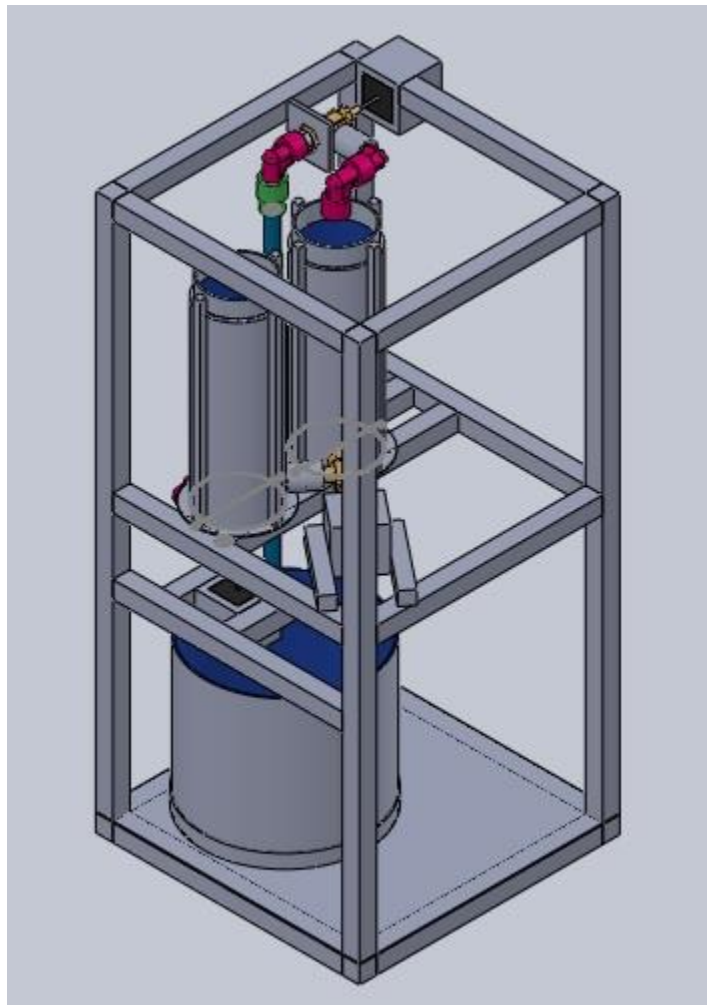
*Figura No.39 Perfil de la planta hecho en Solidworks.*

### **3.5. PROGRAMACIÓN**

Quien cumple la función seguimiento de las variables de presión, temperatura, nivel y caudal, así como de control de los motores y demás operaciones, es el Microcontrolador ATmega328p. La elección de este dispositivo se influyo por la plataforma Arduino UNO R3,



cuyo lenguaje de programación está basado en C++, lenguaje muy usado en la comunidad de programadores y cuya sintaxis no es tan abstracta. Este Microcontrolador es de fácil programación en enlace externo (no requiere estar en una placa Arduino), posee alto rendimiento de procesamiento de datos con la ventaja de bajo consumo de energía y es el indicado para trabajos autónomos. Comercialmente es muy asequible.



*Figura No.40 Perfil de la planta hecho en Solidworks.*

### 3.4. Linealización de las válvulas.

Lo que se pretende en este numeral es llevar la válvula a una operación semejante como lo es una resistencia hidráulica. El comportamiento de la válvula respecto a la regulación del caudal, tiende a dar una respuesta lineal en algunos segmentos de recta, pero eso no es suficiente pues se requiere que su funcionamiento se adapte al modelo matemático de la planta y se valide la analogía válvula-resistencia; aun así, la respuesta de la gráfica es muy próxima a lo que se quiere alcanzar a diferencia de otras válvulas que tienen comportamientos muy variables. Como estrategia se optó por la Linealización por segmentos de recta. A la gráfica obtenida por cada válvula se le asignan una cantidad finita de segmentos, y de ahí se trazan rectas lo más cercano posible a la gráfica original. Luego se condiciona la respuesta dependiendo del ángulo en que se encuentre.

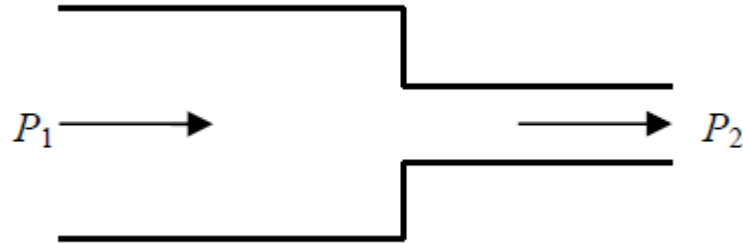
#### 3.4.1. Resistencia hidráulica

La resistencia hidráulica es la resistencia al flujo que se produce como resultado de un líquido que fluye a través de las válvulas o cambios en el diámetro de un tubo como se muestra en la ecuación. Tal caso también puede ser cierto cuando se considera el flujo a través de un tubo corto que conecta dos tanques. La relación entre el cambio en el caudal de líquido  $q$  a través del elemento de resistencia y la diferencia de presión resultante ( $p_1 - p_2$ ) se da como:

$$R = \frac{\text{Diferencia de presión}}{\text{Cambio en el caudal, } m^3/s} = \frac{p_1 - p_2}{q}$$

Donde  $R$  es una constante llamada resistencia hidráulica. Cuanto mayor sea la resistencia mayor será la diferencia de presión para una velocidad de flujo dado. De la ecuación anterior, como la de la resistencia eléctrica y la ley de Ohm, asume una relación lineal. Tales resistencias lineales hidráulicas se producen con flujo ordenado a través de tubos capilares y tapones porosos, pero se

producen resistencias no lineales con flujo a través de orificios de borde afilado o si el flujo es turbulento.



*Figura No.41 Resistencia hidráulica.*

### **3.5. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA.**

Antes de proceder a la etapa de construcción, el conocimiento de cómo presentar un comportamiento dinámico del sistema de control de nivel de líquido, es vital en términos de la determinación de una serie de parámetros relacionados con el sistema en la fase de diseño. Como en muchos sistemas físicos, los sistemas de control de nivel de líquido también presentan un comportamiento dinámico no lineal debido a las características inherentes. Sin embargo, las teorías y los teoremas en los sistemas de control, la mayoría de los cuales sólo se pueden aplicar a los sistemas lineales, se hace necesario modelar sistemas no lineales como un sistema lineal. Cuando se consideran pequeños cambios en el sistema de control de nivel, el sistema puede ser modelado con ecuaciones diferenciales lineales.

Teniendo presente el número de Reynolds, se sabe que en el caso de la planta prototipo, fluye líquido de régimen turbulento a partir de la salida de la bomba. La válvula No1 ayuda a regular el flujo, propendiendo por suministrar un líquido laminar al tanque A dependiendo del grado de apertura de la válvula. Los sistemas que implican flujo turbulento suelen requerir, para

representarse, de ecuaciones diferenciales no lineales, mientras que los sistemas que corresponde a flujo laminar, pueden representarse por ecuaciones diferenciales ordinarias.

El diagrama esquemático del sistema de control de nivel de líquido de segundo orden se muestra en la figura 42. Este sistema posee una válvula (Numero 1) que se encarga de regular el caudal proveniente de la bomba, esta válvula representa un sistema de control de única entrada y salida simple (SISO). En el sistema, cada válvula está controlada por un motor bipolar paso a paso.

La parte superior del tanque de líquido está abierta y tiene una estructura cilíndrica. El sistema de control de nivel de líquido ha sido modelado teniendo en cuenta el cambio en el nivel de líquido que resulta de la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida del líquido en cada tanque. Este sistema puede ser considerado como un circuito que incluye dos capacitancias, y dos resistores.

Este modelo en donde la válvula es representada como una resistencia, es viable solo en caso que las válvulas operen linealmente, para lo cual se hizo menester linealizar cada una de las válvulas y cumplir con el modelo matemático lineal. Un sistema se puede considerar lineal si el flujo es laminar. Una vez realizada la Linealización de la válvula, el caudal de salida es lineal.

- $A_1$  y  $A_2$  es el área de la base del tanque A y B.
- $Q_i$  es el caudal de entrada,  $m^3/seg$
- $Q_o$  es el caudal de salida,  $m^3/seg$
- $H_1$  y  $H_2$  son el nivel del líquido en cada recipiente.
- $R_1$  y  $R_2$  representan el comportamiento lineal de cada válvula como una resistencia.

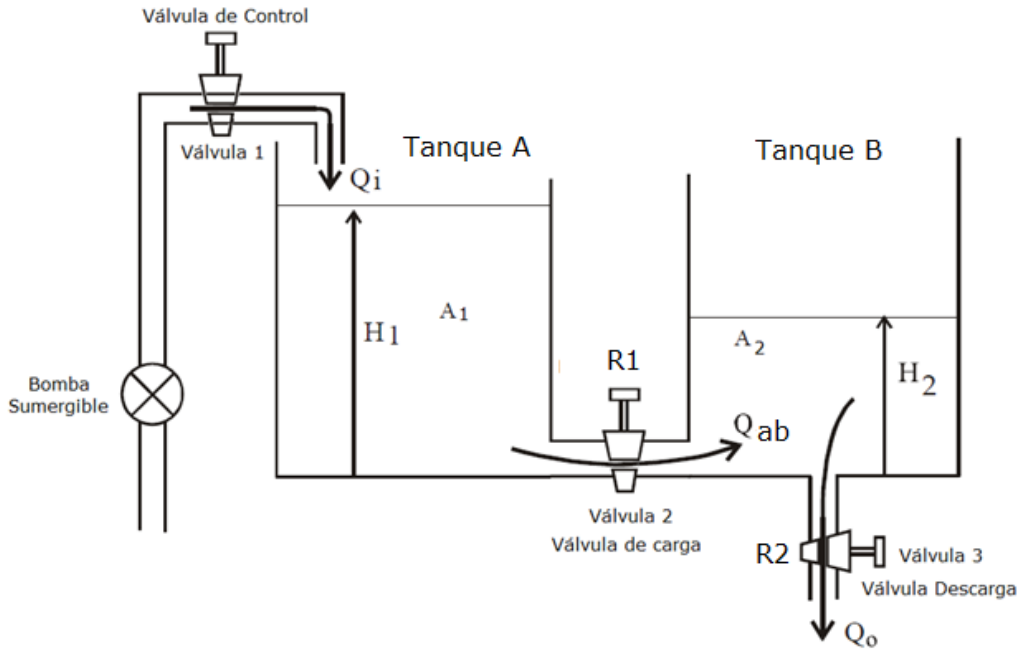


Figura No.42 Esquema del sistema de control de nivel de líquido.

### 3.5.1. Análisis en el tanque A.

El tanque está recibiendo un flujo de entrada  $q_i$  que tiene una determinada altura  $h$  y que está a través de una válvula entregando líquido a un sistema (tanque B). El área de la base es  $A$ .

$A_1 \frac{dh_1}{dt}$  : Representa el cambio de volumen del líquido.

El cambio de volumen depende del caudal de entrada y salida.

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - q_{ab} \quad (1)$$

El elemento resistor se presenta de la siguiente forma:

$$R = \frac{p_1 - p_2}{q} \quad (2)$$

La diferencia de presión se puede escribir como una diferencia de alturas, para lo cual se obtiene

$$q_{ab} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (3)$$

Entonces la ecuación (1) se puede escribir de la siguiente manera:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (4)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-1}{R_1 A_1} h_1 + \frac{1}{R_1 A_1} h_2 + \frac{1}{A_1} q_i \quad (5)$$

### 3.5.2. Análisis en el tanque B.

El cambio de volumen depende del caudal de entrada y salida (tanque A y tanque B).

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_{ab} - q_o \quad (6)$$

El caudal es proporcional a la altura. Es importante anotar que en los sistemas hidráulicos todo lo que está a la atmosfera la presión es cero.

$$q_o = \frac{h_2}{R_2} \quad (7)$$

Por lo cual la ecuación (7) queda de la siguiente forma:

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} - \frac{h_2}{R_2} \quad (8)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{R_1 A_2} h_1 - \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 A_2} h_2 \quad (9)$$

Por lo tanto el modelo del sistema para el tanque A y tanque B se ha obtenido por medio de las dos ecuaciones (5) y (9).

- Modelo en el espacio de estado

Para representarlo en el espacio de estado se debe tener presente lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (10)$$

$$q_i = u \quad x_1 = h_1 \quad x_2 = h_2 \dot{x}_1 = \frac{dh_1}{dt} \dot{x}_2 = \frac{dh_2}{dt}$$

Matriz de estado A y matriz de entrada B:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1 A_1} & \frac{1}{R_1 A_1} \\ \frac{1}{R_1 A_2} & -\frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

Matriz de salida C para medir el nivel del tanque A:

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Matriz de salida C para medir el nivel del tanque B:

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

- Modelo como función de transferencia.

$$A_1 s H_1 = Q_i - \frac{H_1}{R_1} + \frac{H_2}{R_1} \quad (14)$$

$$A_2 s H_2 = \frac{1}{R_1} H_1 - \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} H_2 \quad (15)$$

$$\left[ A_2 s + \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \right] H_2 = \frac{1}{R_1} H_1 \quad (16)$$

$$\frac{[R_1 R_2 A_2 s + R_1 + R_2]}{R_2} H_2 = H_1 \quad (17)$$

$$A_1 s \frac{[R_1 R_2 A_2 s + R_1 + R_2]}{R_2} H_2 = Q_i - \frac{[R_1 R_2 A_2 s + R_1 + R_2]}{R_1 R_2} H_2 + \frac{H_2}{R_1} \quad (18)$$

$$\left[ \frac{R_1 R_2 A_2 A_1 s^2 + R_1 A_1 s + R_2 A_1 s}{R_2} + \frac{R_1 R_2 A_2 s + R_1 + R_2}{R_1 R_2} - \frac{1}{R_1} \right] H_2 = Q_i \quad (19)$$

$$[R_1R_2A_1A_2s^2 + (R_1A_1 + R_2A_2 + R_2A_1)s + 1]Q_o = Q_i \quad (20)$$

La función de transferencia quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{1}{R_1R_2A_1A_2s^2 + (R_1A_1 + R_2A_2 + R_2A_1)s + 1} \quad (21)$$

## CAPITULO 4. CONSTRUCCIÓN

### 4.1. BOMBA

Cada elemento del sistema está supeditado a las características de este aparato, una analogía muy apropiada, sería denominar la bomba como el corazón de todo el sistema. La primera adquisición que se hizo correspondió a este aparato, de aquí fue como se comenzó a desarrollar todo el proyecto, posteriormente fueron llegando los elementos que se adaptaban a las características de la bomba sumergible.

El manual de funcionamiento indica que la bomba no puede funcionar sin agua, siempre debe estar sumergida mínimo a la altura de la misma. La bomba se puede utilizar en agua cuya temperatura no supere los 35°C. Se hicieron pruebas de funcionamiento respecto al nivel mínimo permitido, se observó su trabajo con distintos recipientes, y el tope fue de 8 litros si se quiere usar los tanques A y B con capacidad de 2 litros; En caso contrario lo mínimo eran 4 litros funcionando de forma cíclica y continúa.

La altura del envase donde está alojada la bomba, debe ser al menos el doble de la altura de este. Posee tacones adheribles de hule para mantener su posición fija sin importar las vibraciones generadas por el motor de la bomba. La sección de distribución del líquido tiene un diámetro de media pulgada, incluye un acople para manguera; es viable usar manguera de calibre grueso, ya que la fuerza de expulsión del líquido puede desencajar la manguera.



Su activación se realiza simplemente enchufando el cable a una toma corriente. Se añadió una etapa de protección que funciona con el opto acoplador (MOC3021), que se encarga de permitir el paso de corriente dependiendo de la ubicación del vástago. Esto se realizó porque cuando la válvula queda completamente cerrada, la bomba sigue funcionando (no tiene apagado automático), por lo tanto sigue empujando el agua y al no poder fluir, puede ocasionar averías en la bomba. El código de programación que se encarga de mover la válvula No 1 regula el encendido y apagado de la bomba. Cada vez que el caudal ya no fluya por la válvula No 1, el Microcontrolador envía un pulso al opto acoplador ya sea para habilitar o deshabilitar la bomba.

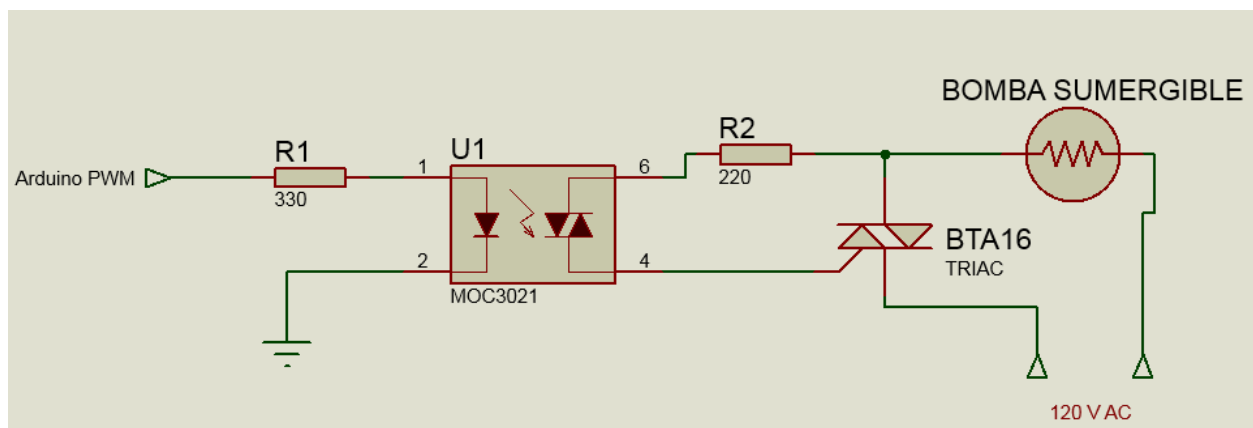


Figura No. 43 circuito de protección encendido y apagado de la bomba sumergible.

#### 4.1.1. Cálculo número de Reynolds

En la mecánica de fluidos hay dos modalidades de flujo, uno laminar, ordenado y suave y otro, el turbulento, oscilante y caótico. Para un flujo laminar hay menos dificultades, muchas de las soluciones son analíticas. El problema que presenta la turbulencia es que no existe ningún modelo general que la represente y permita afirmar “este es el modelo matemático de un flujo

turbulento”. En este caso se cuenta con la ventaja de conocer las ecuaciones de la mecánica de fluidos o ecuaciones generales del movimiento de un fluido.

Cuando fluye agua de una válvula apenas abierta, puede observarse que el movimiento es suave, ordenado, sin oscilaciones y se lo llama laminar; aumentando la apertura, la velocidad aumenta (el parámetro que informa sobre la transición orden-desorden se denomina número de Reynolds) y progresivamente el fluido comienza a oscilar, aumenta el desorden, surgiendo fluctuaciones abruptas. El comportamiento del líquido incide en la respuesta de cada elemento de la planta, puede hacer un símil, al decir que un líquido turbulento es como el ruido que altera una señal, ya sea eléctrica o de información en telecomunicaciones.

Para calcular el número de Reynolds se debe tener presente los siguientes datos (Pumpfundamentals.com, 2017):

- Diámetro de la tubería  $d(in)$ . Para el caso de la planta en general es de 1/2”
- Velocidad del líquido. 450 L/Hora equivalente a 1,65 galones por minuto (gpm)
- Viscosidad del líquido  $\nu (cSt)$ . Usualmente es 1 para temperatura ambiente.

$$\nu(cSt) = 1 \quad gpm = 1,65 \quad d(in) = 0,5$$

Se procede hallar el valor de Caudal vs velocidad para tuberías

$$V(ft/s) = \frac{0,4085 \times q(gpm)}{(d(in))^2} = 2,7$$

Por último se obtiene el valor de la constante de Reynolds.

$$Re = 7746 \times \frac{V(ft/s) \times d(in)}{\nu(cSt)} = 10442$$

El resultado indica que el líquido es demasiado turbulento, quizás esté relacionado con el hecho de que la expulsión del líquido por la bomba es demasiado fluctuante; en la práctica se ha observado que la bomba no empuja el líquido de forma constante.

#### 4.1.2. Cálculo de la presión de la bomba

El fabricante no hace referencia al dato de presión, para hallar el valor ofrecido por la bomba, se requiere tener los valores de:

- Gravedad específica del agua. El valor es 1.
- La altura óptima de la columna de agua. 2 metros (6,56 ft).

$$p(\text{psi}) = \frac{SG * h(\text{ft})}{2,31} = 2,83$$

$$2,83 \text{ psi} = 19,51 \text{ KPa}$$

Teniendo este importante dato, se puede comenzar adquirir los dispositivos que puedan soportar presiones de esta magnitud.

## 4.2. SENSOR DE CAUDAL

Este elemento fue ubicado lo más próximo a la bomba sumergible, es condición tener presente la flecha que está en la parte superior del mismo pues indica el sentido en que debe fluir el líquido. El sensor YF-S201 no es de precisión por lo que la orientación, presión del agua y otras condiciones pueden afectar la medición, se debe trabajar en posición horizontal para evitar turbulencia y fluctuaciones en el líquido, de esta manera se garantiza que la medición no varíe demasiado. Es necesario calibrar periódicamente el dispositivo para obtener datos fiables, se recomienda usar volúmenes conocidos.

#### 4.2.1. Calibración.

Para tener una medición más exacta es necesario calcular el valor del factor de conversión que es el que sirve para pasar la frecuencia de pulsos a caudal de agua. La variable que se puede medir con exactitud es la cantidad de pulsos y el volumen del líquido.

$$k = \frac{n^{\circ}Pulsos}{Volumen.60}$$

Donde K es el factor de conversión, n° Pulsos son la cantidad de pulsos medidos por el sensor, correspondientes al volumen que pasa por el mismo, dicho volumen se mide con ayuda de recipientes con graduación. El primer paso es cronometrar el tiempo que tarda la bomba en llenar un recipiente de 1 litro, después se hace una conversión de unidades, ya que el programa trabaja en la escala L/min o L/Hora, posteriormente se procede a calibrar el sensor y para tal fin existen dos posibilidades:

- Midiendo la cantidad de pulsos por litro. Se carga un código en el Microcontrolador cuya función es obtener la cantidad de pulsos emitidos (solo lectura) por el sensor en cierto volumen de agua. Para tener un valor más exacto es mejor tomar varias muestras y finalmente se promedian los resultados; cuantas más medidas se realicen, mayor precisión habrá. En la figura 44 se puede ver un ejemplo.
- Variando el valor K de forma manual. Se parte del valor K dado por el fabricante y el tiempo de llenado del volumen conocido. Por medio del código cargado al Microcontrolador cuya función es calcular el caudal usando la ecuación de factor de conversión, se procede a variar el valor K del código hasta obtener el caudal correspondiente. Por ejemplo:

La bomba tarda 13 segundos en llenar un recipiente de un litro, se hace una regla de tres y se obtiene 4.6 L/min que es equivalente a 276 L/hora. Entonces hay que variar K hasta obtener el valor que más se aproxime a estas medidas. Se puede decir que este método es por tanteo.

El tiempo empleado para la calibración es relativo. Realizada la calibración, este sensor está listo para ser usado.

| Litros | Pulsos          | K           |
|--------|-----------------|-------------|
| 1      | 436             | 7.27        |
| 1      | 429             | 7.15        |
| 2      | 872             | 7.27        |
| 3      | 1283            | 7.13        |
| 1      | 413             | 6.88        |
| 4      | 1706            | 7.11        |
| 1      | 423             | 7.05        |
| 4      | 1686            | 7.03        |
|        | <b>Promedio</b> | <b>7.11</b> |

*Figura No. 44 Calibración del sensor de caudal, tomada de*

*([http://www.naylampmechatronics.com/blog/47\\_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html](http://www.naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html))*

#### **4.2.2. Modo de operación y código de funcionamiento.**

Es de suma importancia tener en cuenta que este sensor se diferencia de los sensores de presión por emplear señales digitales (un tren de pulsos generado por las revoluciones del sensor magnético de efecto Hall), lo cual hace que para la obtención de la medida de caudal, requiera de

los puertos digitales del Microcontrolador y el algoritmo para el procesamiento de la misma sea distinto.

Para adquirir la medida de manera óptima por parte del sensor, se procede a suministrar energía al elemento, en segunda instancia conectar la señal que genera el sensor a uno de los puertos digitales del Microcontrolador, es necesario hacer énfasis que para obtener la medida en el compilador se requieran habilitar las interrupciones del Microcontrolador (*INT0* ó *INI*), lo cual hace primordial que los pines digitales a usar y que proveen tal característica sean los pines D2 y D3.

A continuación se presenta el código de programación usado para el sensado de la variable caudal:

```
void loop ()
{
// Cada segundo calcular e imprimir Litros/hor
if( millis() - t_Ant > 1000)
{
t_Ant = millis();
pulsosAcumulados += pulsos;
lts_Hora = ((pulsos * 60)/6.925);
pulsos = 0;
litros = ((pulsosAcumulados*1.0)/386);
Serial.print(" Caudal: ");
Serial.print(lts_Hora);
Serial.print(" L/hora ");
Serial.print(" -- Litros: ");
Serial.println(litros);
}
}
```

A groso modo, el código se encarga de procesar cada 1000 milisegundos (1 seg.) los pulsos generados por el sensor, para posteriormente acumular tales pulsos y así calcular el caudal en

Litros/hora con los datos concernientes a la calibración, con la finalidad de imprimirlos por el puerto serial.

### **4.3. SENSORES DE PRESIÓN**

Para todo el sistema se usaron tres de estos sensores, dos son de la misma referencia. El objetivo de cada uno varía dependiendo de la función asignada y la presión a trabajar, por ejemplo, el dúo de sensores tiene como labor sensar la presión en cada uno de los tanques, y el tercer sensor fue adquirido para uso exclusivo de la toma de presión a la entrada del sistema. Estos sensores, son de presión absoluta.

La presión absoluta, es la diferencia entre la presión del líquido y el cero absoluto de presión (también se conoce como presión de vacío). El sensor de presión diferencial, se utiliza para expresar la diferencia entre dos valores de presión absoluta. Como el propósito no es obtener la diferencia entre dos presiones absolutas, fue la razón por la cual se eligió el sensor de presión absoluta.

A continuación se mencionan la referencia de los sensores a usar, su justificación y su tarea asignada.

#### **4.3.1. Sensado nivel del líquido en cada tanque.**

El sensor MPX5010GP es quien cumple la función de medir la presión que hay dentro de cada tanque, con el fin de realizar una conversión presión-nivel. Este procedimiento permitirá obtener el nivel del líquido dentro de cada uno de los recipientes. Cuando el sensor está operando, va recibiendo la presión ejercida por el líquido, el sensor convierte la presión en

voltaje, resultado que se puede observar a la salida del mismo. La función obtenida, es de respuesta lineal.

El acople sensor – tanque se pensó de dos formas.

- Usando un tubo con manguera en su interior. Este conjunto se insertaba dentro del recipiente, cumpliendo con la condición de mantener una posición vertical con ángulo de 90 grados, no podía tocar la superficie horizontal del tanque. En las notas de aplicación proporcionadas por el fabricante, se recomiendan usar este método, pero en el presente caso, no trabajo satisfactoriamente y sus datos eran erráticos.
- Haciendo un orificio en la parte inferior del tanque. Por medio de una manguera que conecta con la boquilla del sensor de presión, se unió al orificio que se hizo en el tanque. Se debe tener presente que en la conexión no se deben tener burbujas de aire (generan muchas oscilaciones en la medida) y además la manguera debe permanecer con agua, por lo que el tanque no puede quedar vacío, lo indicado es dejar una pequeña cantidad de líquido en el tanque para cumplir con esto. Este método fue más viable y los datos tienden a mantenerse constantes.

La manguera que esta insertada en la boquilla del sensor de presión, debe estar muy bien ajustada y el líquido debe ingresar para no dejar burbujas de aire. Estos sensores están diseñados para trabajar con agua, no hay riesgo eléctrico. Cuando la presión ejercida es superior al rango de trabajo, el sensor posee un orificio para que el agua escape, pero el sensor quedaría inservible.

La hoja de especificación de datos del sensor, provee al usuario de una ecuación que relaciona la presión con el voltaje para obtener la presión ejercida sobre el sensor.

$$V_{out} = V_s(0.09P + 0.04)$$



Donde:

- $V_{out}$  es el voltaje de salida
- $V_s$  es el voltaje de alimentación del sensor
- $P$  presión que hay sobre el sistema.

Para obtener la presión, se despeja la ecuación anterior.

$$P = \frac{V_{out} - 0.04V_s}{0.09V_s} = \text{Presion (KPa)}$$

#### **4.3.1.1. Calibración para obtener el nivel de líquido.**

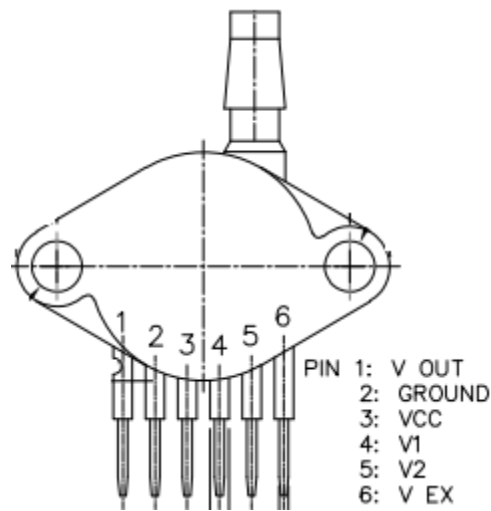
Se hace la aclaración de que el sensor de presión por fabricación esta calibrado, lo que se pretende con esta práctica es relacionar el nivel del líquido con la presión, para ello se requiere tomar mediciones. La resolución para el nivel del líquido es de 5 mm y se usó porque el sensor es muy sensible, además tiene un error del 5% respecto a la medida.

Lo que se hizo fue comenzar a variar el nivel del líquido y tomar el valor de la presión respecto a ese punto y así sucesivamente. Para obtener valores reales, es apropiado realizar varias mediciones. Posteriormente se cargan estos datos al Microcontrolador que se encargara de hacer el tratamiento de los datos.

#### **4.3.1.2. Lectura de la señal del sensor de presión MPX5010GP en el Microcontrolador**

Los sensores MPX5010GP los cuales están encargados de medir tanto la presión como el nivel de los tanques A y B del sistema, poseen la ventaja de que su señal de salida ya está acondicionada (en un rango de 0.2V a 4.7V) y no requieren de circuitería adicional (salvo el circuito de alimentación). Como esta referencia de sensor suministra una señal analógica proporcional a la presión que se le ejerce (lineal), a la hora de leer dicho voltaje por parte del

Microcontrolador, se emplea una conexión similar a la del sensor de MPX2050GP, de esta manera el pin con la señal de salida del sensor MPX5010GP se conecta a uno de los puertos analógicos de entrada del Microcontrolador (en este caso A0), y su puesta a tierra debe ir en común con los dispositivos empleados en el proceso, tal como lo indica la hoja de datos del sensor.



*Figura No. 45 Configuración de pines del sensor MPX5010GP con encapsulado 867B-04,*

*Tomada de (<http://ee-classes.usc.edu/ee459/library/datasheets/MPX5010.pdf>)*

Una vez realizadas las conexiones pertinentes se procede a realizar la programación; el código de programación que se empleó en el Microcontrolador para medir tanto el nivel como la presión de cualquiera de los tanques A y B es el que se menciona a continuación:

```
void loop() {
sen_5010=(analogRead(0) + 5*sen_5010)/6;
float Voltaje=(float) sen_5010 * 4.99 / 1023.0;
float presion1 = ((Voltaje-(0.04*5.04))/(0.09*5.04));
float presion2 = (presión*0.145038);
```

```
float altura = ((29.241*VoltajeA)-1.5578);  
Serial.println(" ** Sensor (B)= MPX_5010 ** ");  
Serial.println(VoltajeB,3);  
Serial.print(presion1B,3);  
Serial.print(presion2B,3);  
Serial.print(altura );
```

El código se fundamenta en imprimir los valores de presión y nivel del tanque a partir de la señal de voltaje leída por el Microcontrolador. Inicialmente para obtener la lectura indicada del puerto analógico se hace necesario medir con un voltímetro el valor el cual está alimentado el Microcontrolador (4.99V), para posteriormente digitarlo en la línea de código encargada de la obtención de voltaje, una vez realizada la correcta adquisición del voltaje por parte del sensor, se procede a realizar la conversión de voltaje a presión (kilopascales) con la formula proporcionada por el fabricante en la hoja de datos, la cual es mencionada en el numeral 4.3.1., para calcular la presión en psi se toma el valor en kilopascales y se multiplica por la constante 0.145038, la cual equivale a 1 kPa en libra-fuerza por pulgada cuadrada, y por último se obtiene la medida de nivel insertando la ecuación calculada la cual proviene de realizar la Linealización entre los valores en voltaje de cada centímetro de agua que hay en el tanque.

Al finalizar el procedimiento, la salida del Microcontrolador es un tren de pulsos digitales. Para realizar la conversión de estos pulsos a voltaje, se hizo necesario implementar una etapa de conversión digital – analógico, proceso que se menciona en el numeral 4.8.6 conversor digital analógico.

Hecho este proceso, la salida es un voltaje analógico con un valor que oscila de 0 VDC - 10VDC, siendo 0v el voltaje que indica el nivel mínimo del tanque y 10v el nivel máximo. Este rango de voltaje se eligió para tener mayor resolución y se adapte a la tarjeta de adquisición de datos NI-6008.

#### **4.3.2. Sensado presión de salida de la bomba.**

El sensor MPX2050GP se adapta a la presión de la bomba cuyo valor es 2.83 psi (19.51KPa) ya que la máxima presión que puede soportar son 7.25 psi (50KPa), viene calibrado de fábrica y es un sensor de presión absoluta. Se adapta por medio de una manguera pequeña que está conectada a la manguera principal, la toma de presión debe ser horizontal respecto a la manguera principal, es aconsejable no dejar burbujas de aire pues la medición fluctúa bastante. Algo importante que se debe mencionar, es que la bomba no empuja el agua de forma constante, por lo que los valores de presión suelen variar.

Su salida está en la escala de los milivoltios, por lo que se optó por usar un amplificador operacional (Esto es opcional), para mejorar la lectura de los datos por parte del Microcontrolador.

##### **4.3.2.1. Diseño de la etapa de amplificación de la señal del sensor de presión MPX2050GP**

Para lograr que la señal de salida por parte del sensor MPX2050, la cual opera en el rango entre los 1mV a 40mV, pueda ser interpretada por el Microcontrolador encargado de tomar las señales de los sensores de presión involucrados en el sistema, se hace necesario diseñar una etapa de amplificación para el acondicionamiento de dicha señal. Esta etapa de amplificación se hace conveniente, ya que las características de los puertos analógicos de entrada por parte del

Microcontrolador, no logran adecuadamente interpretar la señal de salida provenientes del sensor de presión, que como se mencionó anteriormente está comprendida en milivoltios.

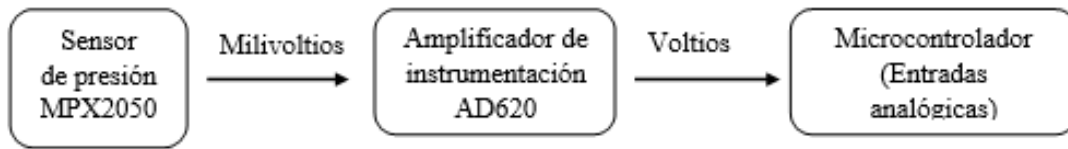


Figura 46. Diagrama de bloques del diseño para el acondicionamiento de la señal del sensor MPX2050.

#### 4.3.2.1.1. Amplificador de instrumentación AD620

El amplificador de instrumentación AD620 del fabricante AnalogDevices consta de distintas características de operación, una de ellas es su reducido nivel de ruido y poco consumo de corriente (1.3mA), y a su vez posee la ventaja de que se adquiere fácilmente en el mercado por su reducido costo y fácil configuración.

Una ventaja por parte del amplificador de instrumentación, es que para poder modificar su ganancia de amplificación, que está comprendida entre  $G=1$  a  $G=1000$ , requiere modificar un valor específico de resistencia  $R_G$ , lo cual facilita su diseño y posterior operación.

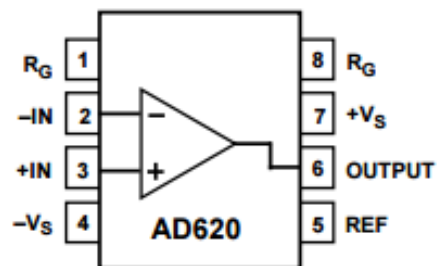


Figura 47. Amplificador de Instrumentación AD620. Tomada de (<http://www.analog.com>)

La información más relevante respecto al amplificador de instrumentación AD620 se describe a continuación.

- Asignación de pines:
  - 1-8 Resistencia para determinar la ganancia
  - 2- Entrada de voltaje negativo
  - 3- Entrada de voltaje positivo
  - 4-7 Voltajes polarizados de alimentación
  - 5- Voltaje de referencia
  - 6- Voltaje de salida del amplificador
- Opera con un rango de voltaje de alimentación entre los  $\pm 2.3\text{V}$  y  $\pm 18\text{V}$
- Baja potencia en la operación, Corriente de alimentación máxima de 1.3 mA
- Nivel bajo de ruido
- Empleado en Básculas de pesaje, instrumentación médica, sistemas de adquisición de datos y controles de procesos industriales.

#### **4.3.2.2. Diseño de la etapa**

A la hora de diseñar la amplificación de la señal de salida por parte del sensor MPX2050, es necesario conocer en la hoja de datos del fabricante su rango máximo a la salida en voltaje cuando se ejerce la presión máxima al sensor.

De esta manera se sabe que 40mV será su máximo voltaje cuando el sensor se alimente con un voltaje típico de 10V y se ejerza la presión máxima al sensor (7.25 PSI), esto hace que sea necesario amplificar la señal de 40mV unas 100 veces para así obtener a la salida del amplificador de instrumentación un voltaje de 4V. Una vez expresado el valor deseado de

amplificación se configura el amplificador de instrumentación para que su ganancia sea  $G=100$  con la siguiente formula, la cual es proporcionada en la hoja de datos del fabricante:

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1 \Rightarrow R_G = \frac{49.4k\Omega}{100 - 1}$$

$$R_G = 498.99\Omega$$

| Características         | Símbolo   | Mínimo | Típico | Máximo | Unidad |
|-------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Rango de presión        | Pop       | 0      | -      | 7.25   | PSI    |
| Rango máximo de voltaje | $V_{fss}$ | 38.5   | 40     | 41.5   | mV     |
| Voltaje de alimentación | $V_s$     | -      | 10     | 16     | Vdc    |

Figura 48. Especificaciones del sensor MPX2050

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, remplazando valores y calculando  $R_G$  se sabe que para obtener una ganancia de 100 es necesario conseguir un valor de resistencia de  $498.99\Omega$  entre los pines 1 y 8 del amplificador, como en el mercado actual no hay resistencias de tal valor se emplean 3 resistores en serie de valores:  $390\Omega$ ,  $100\Omega$  y  $8.2\Omega$ .

#### 4.3.2.3. Calibración para obtener la presión de salida de la bomba.

En este caso solo se requiere tener presente las recomendaciones hechas por la hoja de datos del dispositivo, por ejemplo, dice que la ecuación inherente al sensor es la siguiente:

$$V_{out} = V_{off} + sensitivity \times P$$

- $V_{out}$ . Voltaje de salida en respuesta a una presión de entrada.

- Voff (voltaje de offset) Se define como la tensión de salida a la presión nominal mínima. Según la hoja de datos, esta variable posee el valor de cero.
- Sensitivity. Sensibilidad del dispositivo, según la hoja de datos, esta variable tiene un valor 0.8.
- P. presión que percibe el sensor.

Ordenando la ecuación se obtiene:

$$p = \frac{V_{out} - V_{off}}{sensitivity}$$

Teniendo presente lo anterior, el sensor está listo para trabajar en conjunto con el Microcontrolador.

#### **4.3.2.4. Lectura de la señal del sensor de presión MPX2050GP en el Microcontrolador.**

El sensor encargado de la toma de presión, a la salida de la bomba, proporciona una señal analógica de voltaje DC cuando está en funcionamiento, la cual es acondicionada tal y como se aprecia en el numeral 4.3.2.1.1., una vez que el voltaje es acondicionado es necesario hacer su procesamiento con el Microcontrolador para convertir esa señal de voltaje en una lectura de presión conocida. Con la ayuda de los puertos analógicos del Microcontrolador (en este caso A2) la señal es leída para posteriormente programar el Microcontrolador.

A continuación, se relaciona una parte del código de programación encargado de leer el voltaje acondicionado del sensor y su posterior salida por el puerto serial:

```
void loop() {
sen_2050C = (analogRead(2) + 5*sen_2050C)/6;
float Voltaje C = (float)sen_2050C * 4.9/ 1023.0;
float presión 1C = (VoltajeC/0.08);
```



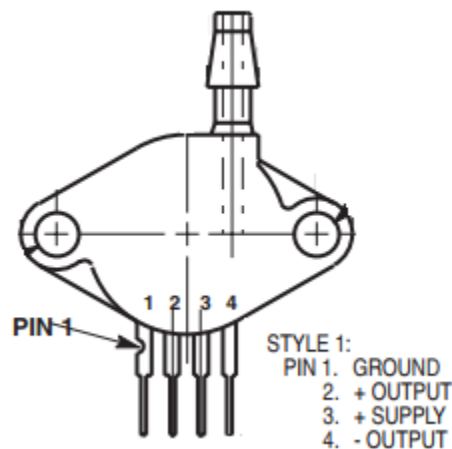
```
float presión 2C = (presion1C*0.145038);  
Serial.println("*** Sensor MPX_2050 *** ");  
Serial.println(VoltajeC,3);  
Serial.print(presion1C,3);  
Serial.print(presion2C,3);  
}
```

El código expuesto está fundamentado en tres etapas: En primera instancia hace lectura del voltaje por medio de uno de los pines analógicos de entrada del Microcontrolador y a su vez, promedia las muestras del ADC en aras de evitar fluctuaciones del valor leído, una vez obtenido el valor en voltaje se programa la conversión de voltios a presión, tanto en kilopascales como en psi, con ayuda de la ecuación 4.3.2.3. proporcionada por la hoja de datos del sensor de presión, y finalmente por medio del puerto serial, se imprime el valor en voltaje y presión que proporciona el sensor.

#### **4.3.2.4.1. Recomendaciones al momento de realizar la lectura del sensor**

- La resolución del ADC del Microcontrolador es de 10-bit
- La señal de salida del sensor acondicionada debe conectarse a cualquier entrada analógica del Microcontrolador
- La puesta a tierra (GND) del sensor debe ser en común, tanto con la fuente que lo alimenta y el Microcontrolador.
- No es recomendable que a los puertos analógicos de entrada se le ingresen valores de voltaje mayores de 5V.

- El tipo de encapsulado del sensor puede variar según la aplicación y si es para montaje superficial, esto haría que la distribución de los pines sea diferente.
- El pin 1 del sensor se distingue de los demás por una pequeña fisura que tiene en uno de sus bordes, tal y como se puede apreciar en la configuración de pines de la figura 49
- Para la lectura de un voltaje más preciso en el Microcontrolador, se recomienda digitar en la programación el valor medido en voltaje en que es alimentado el Microcontrolador.



*Figura No .49 Configuración de pines del sensor MPX2050 con encapsulado 344B-01,*

*Tomada de (<http://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX2050.pdf>)*

#### 4.4. VÁLVULAS

Estos elementos generalmente tienen respuestas muy variables y eso depende del obturador, existen aquellas que cumplen el objetivo de trabajar linealmente pero su costo es muy elevado, además están hechas de acero inoxidable, material muy pesado. Lo que se pretende es usar una válvula que sea asequible entendido desde lo económico como en la disponibilidad del elemento. Encontrar una válvula que reúna el principal requisito propuesto, es una tarea de paciencia y dedicación, hay válvulas de todo tipo, y cada una tiene su comportamiento. Cuando por fin se escogió la válvula a implementar, se eligió por su respuesta inherente, pues tiene una

función que se puede llevar con mayor facilidad a la linealidad, se reduce el trabajo drásticamente y se puede tener un mejor control respecto a la respuesta de la válvula.

#### **4.4.1. Obtención valor resistencia hidráulica.**

La primera tarea que se realizó fue hallar la resistencia hidráulica de cada una de las válvulas para cumplir con el modelo matemático. Recordando la ecuación del numeral 3.4.1 (que habla de la resistencia hidráulica) se debe tener presente la norma ANSI/ISA-75.02-1996 “*Control valve capacity test procedures*” para hallar dicho valor. La norma indica que la toma de las presiones a la entrada y salida de la válvula debe estar a cierta distancia para obtener resultados confiables respecto a esta variable y garantizar que el líquido sea lo menos turbulento. Es condición realizar esta medición con respecto a la fuente, en este caso, la bomba sumergible, por lo que cada válvula se turnó para adquirir los datos, un ejemplo de puede observar en la figura 50. Se intentó realizar la medición para las válvulas 2 y 3 en sus correspondientes sitios de trabajo, pero los valores de presión, eran muy pequeños y no se podía obtener el comportamiento de la válvula desde estos puntos.

Según indica la figura 51, la toma de presión a la entrada que está ubicada a una distancia B, debe ser 2 veces el diámetro de la tubería, es decir, 1 pulgada (2.54 cm) y la distancia C para la toma de la presión de salida debe ser de 6 veces el diámetro de la tubería, es decir, 3 pulgadas (7.62 cm). Realizada esta labor se observó que la presión a la salida de cada válvula registraba valores muy pequeños; la única manera de obtener estos datos, sería usando un sensor de presión que trabaje presiones más bajas de lo usual y en el mercado no fue posible hallar dichos elementos, por lo cual se asumió ese valor como cero. Es importante anotar que en los sistemas

hidráulicos toda salida que está a la atmosfera, hace que su presión sea cero, es muy similar a la tierra de los sistemas eléctricos.

La ecuación de la resistencia hidráulica quedaría de la siguiente manera:

$$R = \frac{p_1}{q}$$

En conclusión, la válvula cumple con las condiciones para ser acondicionada para trabajar linealmente.

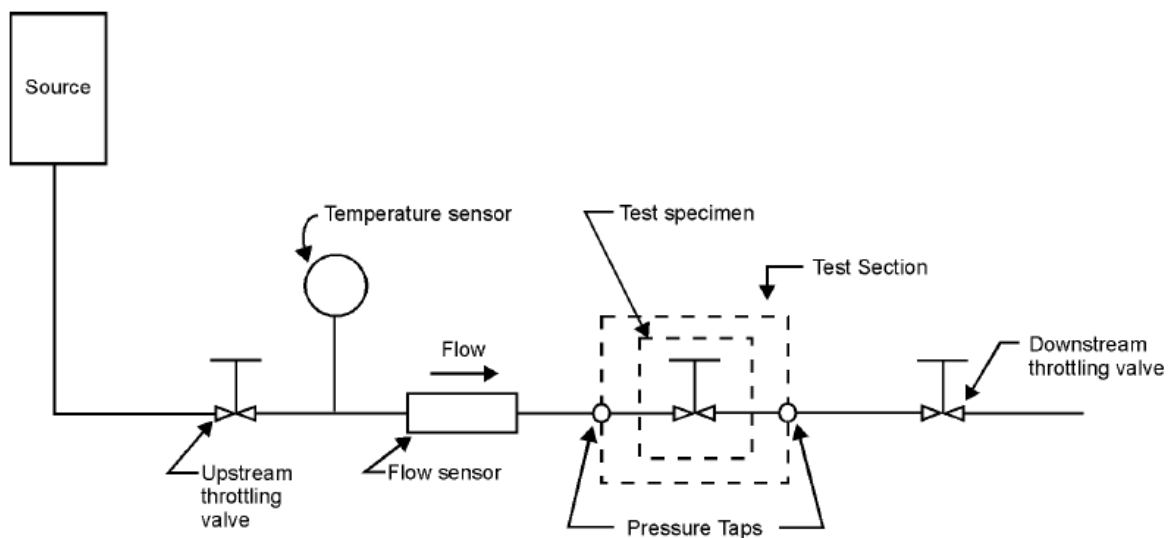


Figura No.50 Basic flow test system, tomada de (ANSI/ISA-75.02-1996 “Control valve capacity test procedures”, p.11)

#### 4.4.2. Linealización de las Válvulas de regulación

Para realizar el control de apertura y cerrado de cada válvula, se procedió a realizar la gráfica *grados de apertura vs Caudal L/H* cuya respuesta tiende a ser lineal, el caudal depende del grado de apertura de la válvula. Los datos obtenidos, se trabajan en el entorno del software Matlab, en donde se usan los comandos *polyfit* y *polyval*, que son los que permitirán realizar la linealización, para que las válvulas operen linealmente y todo el sistema se ajuste a la ecuación

de la planta (numeral 3.5). En el caso de *polyfit*, hace un acoplamiento de la curva, devuelve los coeficientes para un polinomio  $p(x)$  de grado  $n$ ; la aproximación de la nueva curva respecto a la original, dependerá del grado del polinomio.  $P(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1}$ .

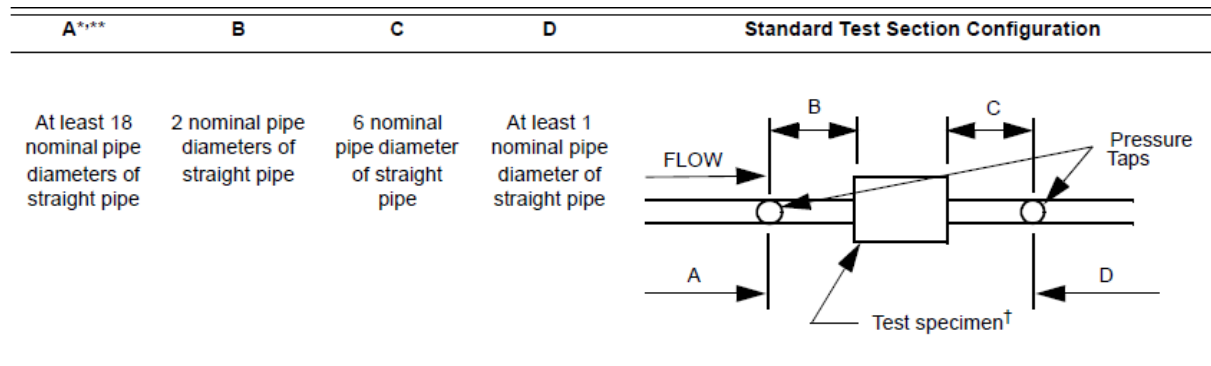


Figura No.51 Piping requirements, standard test section, tomada de (ANSI/ISA-75.02-1996

“Control valve capacity test procedures”, p.12)

*Polyval*, evalúa el polinomio generado por la función *polyfit*, usando los datos de la abscisa, esto con el fin de observar que tan coincidente es la gráfica obtenida con la original. Este comando encuentra gran utilidad si se le usa en un cuadro grafico del entorno del Matlab para poder comparar ambas funciones.

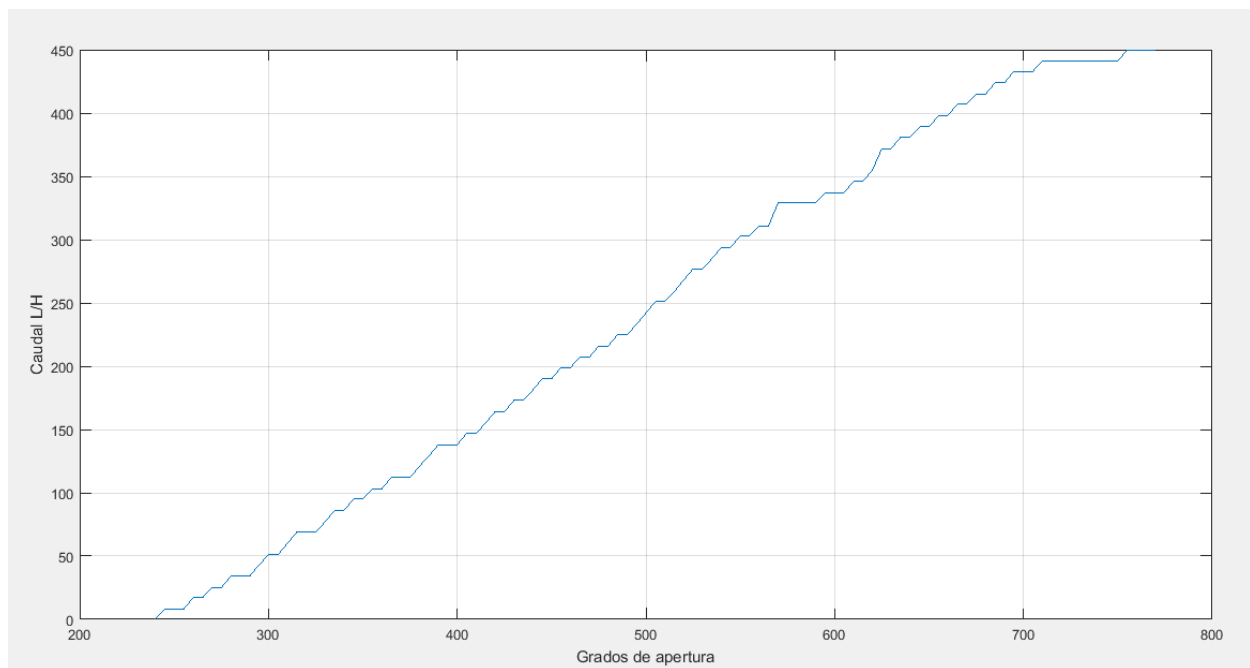
El Código es el siguiente:

```
plot(gra,Cau)% realiza el grafico de grados vs caudal, segundo
los datos ingresados.
formatshorte% formato de punto flotante, con 5 dígitos.
PolyB=polyfit(gra,Cau,1)% genera el polinomio de la función y su
aproximación depende del grado del mismo, en este caso es 1 para
obtener un binomio de la forma mx+b.
funcion_out=polyval(PolyB,gra); % Evalúa el polinomio.
holdon%se usa para realizar las dos graficas en una sola.
plot(gra,funcion_out,'g')% esta grafica se superpone a la
original, para comprar la línea de tendencia respecto a la
original.
```

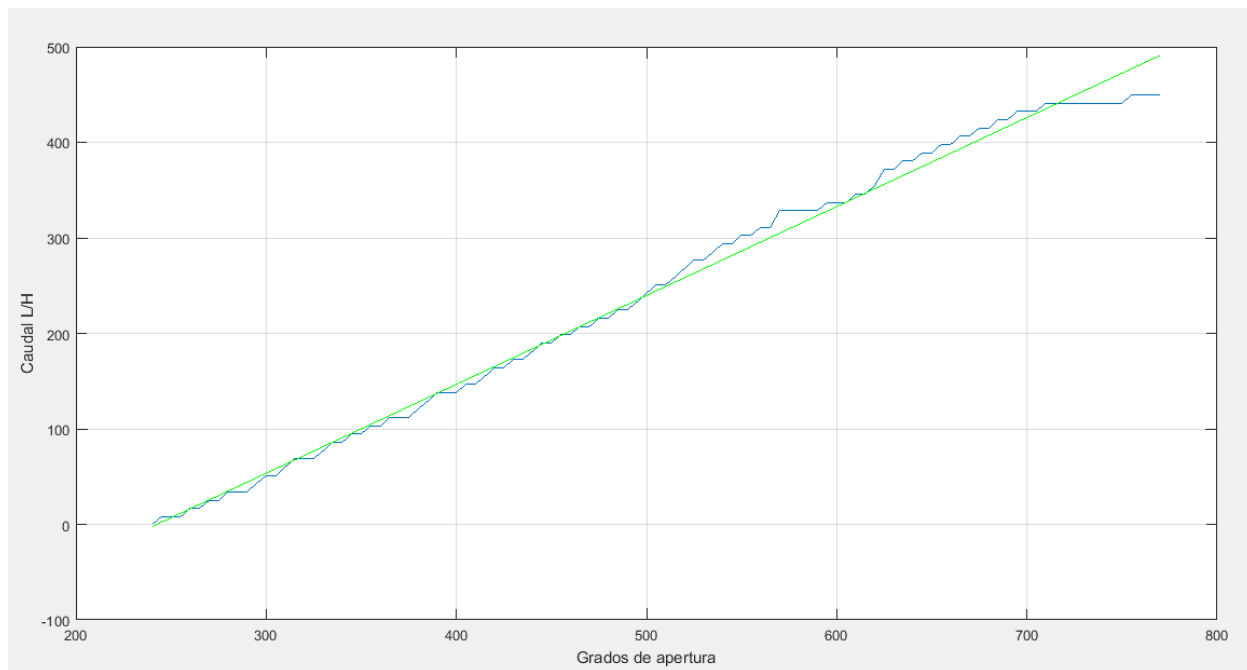
gridon%Muestra las principales líneas de cuadrícula para los ejes actuales o el grafico.

Como lo que se quiere hacer es linealizar, lo ideal es obtener una ecuación de la forma  $y=mx+b$ , pero debido a la gran cantidad de datos y que estos son muy variables, se dificulta obtener una aproximación de este tipo para toda la función, por tanto lo recomendado es trabajar la función a trozos y generar polinomios que no excedan el grado 2, esto con el fin de obtener una gráfica 100% coincidente respecto a la original y agilizar dicha tarea. La reconstrucción de la función original, se obtiene uniendo todos los trozos de la función obtenida.

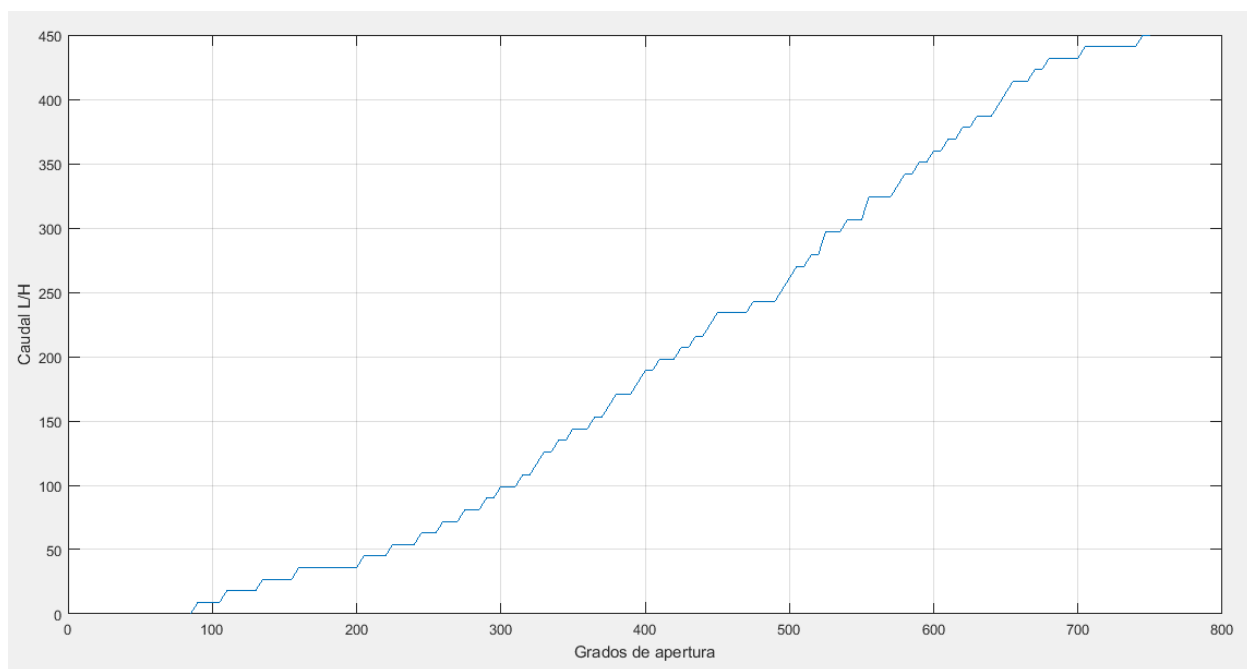
Los coeficientes obtenidos por cada función linealizada de cada una de las válvulas, se utilizan en el código de programación que se encargara de mover el motor correspondiente a cada válvula.



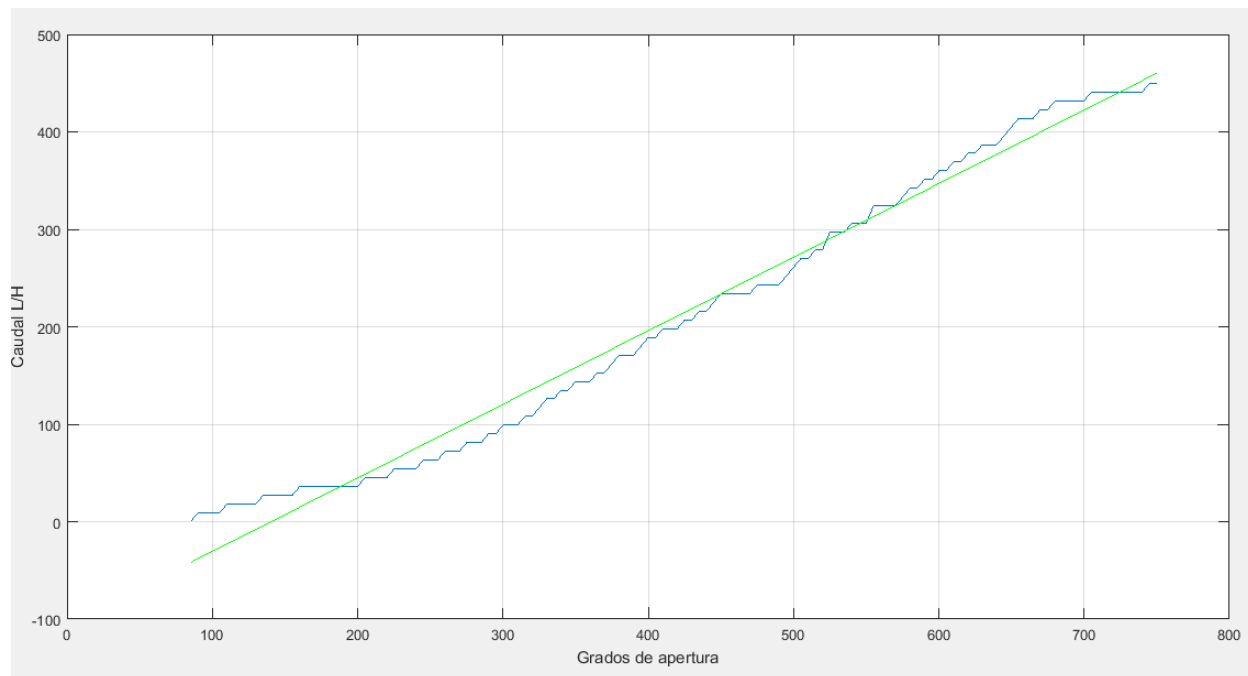
*Figura No.52 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 1*



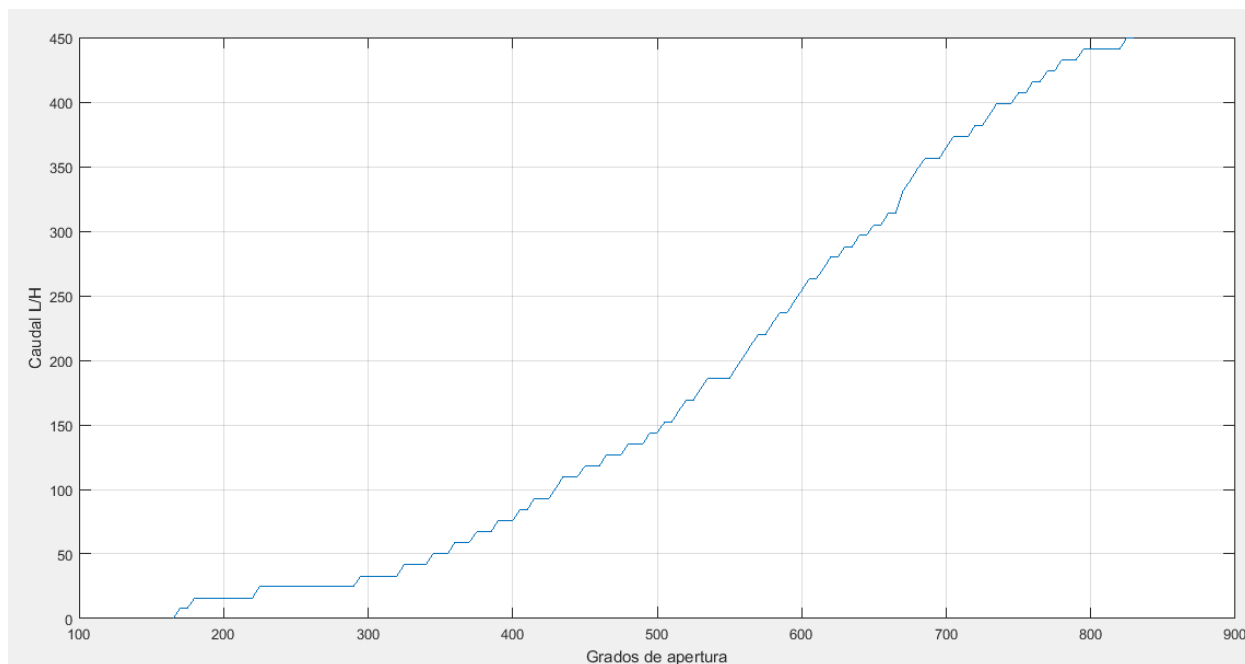
*Figura No.53 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 1 con aproximación polinomial de grado 1.*



*Figura No.54 Grafico Grados de apertura vs Caudal válvula 2*

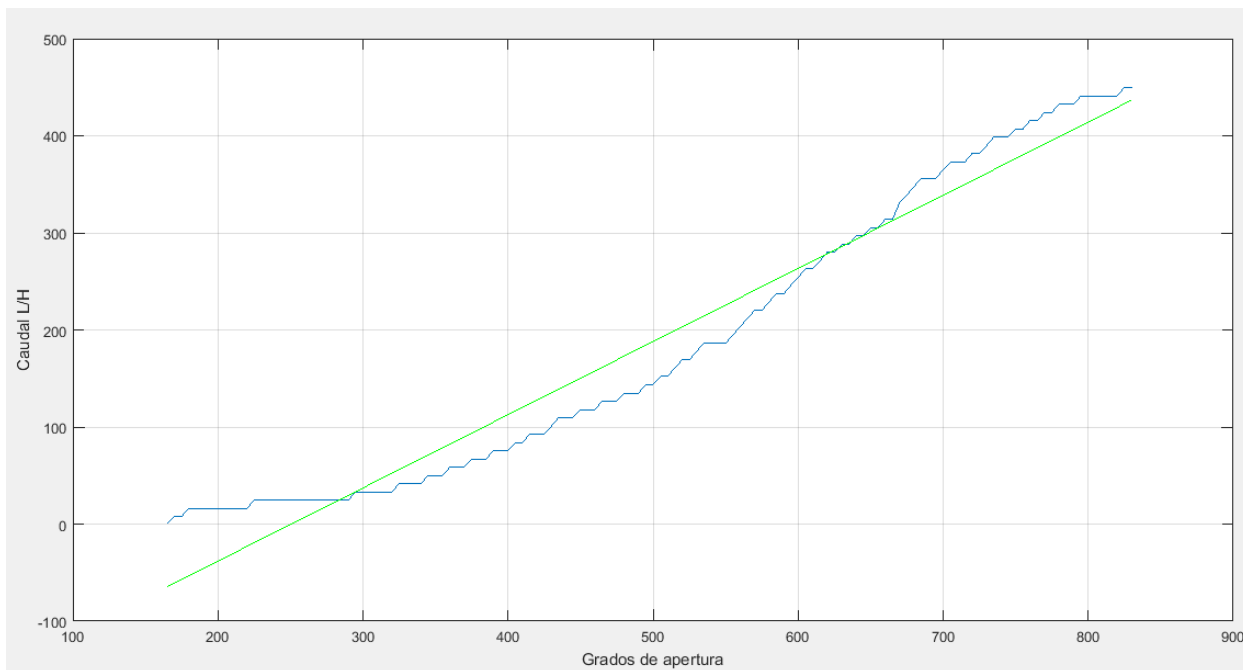


*Figura No.55 Grafico Grados de apertura vs caudal válvula 2 con aproximación polinomial de grado 1.*



*Figura No.56 grafico Grados de apertura vs caudal válvula 3*





*Figura No.57 grafico Grados de apertura vs caudal válvula 3 con aproximación polinomial de grado 1.*

Realizado todo este procedimiento, la válvula está preparada para ser acoplada y acondicionada al actuador.

#### **4.4.3. Programación control de giro válvula motorizada**

El Microcontrolador fue acondicionado para mover el eje del motor dependiendo de un voltaje de entrada que está relacionado con el proceso de Linealización de la válvula. Esto permite que cuando se ingresa un voltaje de corriente continua cuyo valor varía de 0VDC – 5VDC, siendo cero el valor que indica el cierre total de la válvula y 5 el valor máximo de apertura.

Para iniciar con el movimiento de la válvula motorizada, es imprescindible tener preparada la etapa de potencia, la cual posibilita el movimiento del eje del motor 17HS4401, tal y como se mencionó en el numeral 4.7. La programación para el control de giro del eje de la válvula

motorizada se estableció en 4 partes, como el movimiento del motor depende del voltaje leído por parte del Microcontrolador, éste en primera instancia obtendrá el voltaje por medio del conversor analógico digital (ADC), al tener el valor que se le ingresa en voltaje, posteriormente éste se condiciona por medio de los operadores de comparación *if*, los cuales corresponden al valor tanto en grados como en caudal de la Linealización de las válvulas (ver figuras de la 52 a 57), al cumplir con una de esas condiciones retorna un valor en grados, el cual le permite posteriormente al Microcontrolador determinar cuántos grados moverá el motor y así enviar los pulsos correspondientes al driver. Como aspecto fundamental, se precisa que para el giro por medio de grados, se debe realizar un factor de conversión entre el número de pasos que da el motor para hacer una vuelta y los 360 grados, de acuerdo a lo anterior se obtiene que:

$$\frac{\text{numero de pasos en una revolución}}{\text{número de grados en una revolución}} = \frac{200}{360^\circ} = \mathbf{0.5555555556}$$

El valor calculado se hace necesario para hacer el ajuste de 200 pasos del motor a los 360 grados, de esta manera el motor logrará mover los pasos hasta llegar al valor correspondiente en grados, a continuación se relaciona parte del código empleado para el giro de una de las válvulas motorizadas:

```
if(volt_in>=0&&volt_in<0.46){
  grados=70;
  caudal=0;}
Serial.print(caudal);
Serial.print(grados);
grados = (grados * 0.5555555556); // Ajuste de 200 vueltas a los 360 grados
while (grados>numero_pasos){ // Giro hacia la izquierda en grados
digitalWrite(dirPin,HIGH);
```

```

digitalWrite(stepPin,HIGH);
delayMicroseconds(retardo);
digitalWrite(stepPin,LOW);
delayMicroseconds(retardo);
numero_pasosC = numero_pasos + 1;}
while (grados<numero_pasos){ // Giro hacia la derecha en grados
digitalWrite(dirPin,LOW);
digitalWrite(stepPin,HIGH);
delayMicroseconds(retardo);
digitalWrite(stepPin,LOW);
delayMicroseconds(retardo);
numero_pasos = numero_pasos -1;}
digitalWrite(stepPin, LOW);

```

Al finalizar el proceso, el Microcontrolador envía al driver una serie de pulsos gracias a las instrucciones `digitalWrite(dirPin,LOW);` y `digitalWrite(stepPin,HIGH);` los cuales corresponden a los pines *step* y *dir*, encargados cada uno de la dirección (izquierda o derecha) y pulsos necesarios para mover el eje del motor.

#### 4.4.3.1 Apreciaciones

Al realizar el proceso se consideró que:

- Es imprescindible tener en cuenta la información suministrada por el fabricante (hoja de datos), esto hace que el proceso de giro por parte del motor sea el más adecuado y así se eviten posibles irregularidades.
- Según la hoja de datos el motor, maneja  $1.8^\circ$  por paso y su precisión angular por paso es del 5%, lo cual hace que su exactitud esté supedita a tales especificaciones.
- Es de mencionar que los tiempos que demora el motor en moverse deben ser tenidos en cuenta, ya que son producidos por los retardos programados en el Microcontrolador.

#### **4.5. Conversor digital analógico**

Para que las señales provenientes de los sensores del sistema puedan ser procesadas por el sistema de adquisición de datos, se requiere de un acondicionamiento en voltaje de tal manera de que si su valor mínimo, el cual es registrado por el sensor (ya sea de presión, caudal o temperatura) éste proporcione un voltaje nulo o mínimo (0V), y si los sensores registran un valor máximo de la medida en el sistema, su salida será aproximadamente 10V como máximo (debido a las especificaciones de la tarjeta de adquisición NI-6008), cabe acotar que dichas salidas requieren de una etapa de filtrado y amplificación, tal como se puede apreciar en el numeral 4.8.6.

Una ventaja del Microcontrolador es que brinda la posibilidad de generar señales por medio de sus puertos digitales, se hace importante aclarar que con esta referencia de Microcontrolador (ATmega328P) no todos los pines digitales tienen tal propiedad, y se hace imprescindible emplear los pines que tienen la facultad de generar un ancho de pulso modulado (PWM). Las salidas PWM poseen una técnica para generar, en cierta medida, una señal analógica que consiste en modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica, teniendo en cuenta lo anterior, se

aprovechan las salidas PWM del dispositivo para hacer la adecuación en voltaje con rango de 0V a 5V (sin etapa de amplificación y filtrado) de acuerdo a la medida del sensor.

Para programar y posteriormente generar una óptima señal por PWM se debe tener en cuenta:

- Los pines con salida PWM en la board Arduino UNO son: D3, D5, D6, D9, D10 Y D11.
- La resolución de las salidas PWM es de 8-bits (valores con un rango entre 0 a 255)
- La frecuencia de operación de los pines está comprendida aproximadamente entre los 490 Hz y los 500 Hz
- Los pines a utilizar deben ser configurados como salidas con la instrucción:  
*pinMode(pwmPin3, OUTPUT);*
- En el *loop* del programa, se emplea la instrucción *analogWrite(pwmPin3, 255)* para generar a la salida PWM un valor en específico (en este caso 5V)
- La función *map (sensorVal, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh)* resulta ser útil cuando se desea obtener una salida lineal de voltaje de acuerdo a los valores que registre el sensor

Para los sensores involucrados en el sistema hidráulico se aprovechó tal técnica; en términos generales y a manera de ejemplo, las líneas de código que se encargaron de realizar el proceso fueron las siguientes:

```
float pwB = 255.0 / (4.99/(voltaje_outB))+0.9;
```

```
analogWrite(pwmOutB, pwB);
```

Las líneas relacionadas anteriormente, se emplearon con los sensores analógicos de presión para tomar el valor calculado de presión, relacionarlo con un valor en voltaje y así convertirla en una salida proporcional a tal medida. Ulteriormente se cambia la estrategia con los sensores digitales,

tanto de temperatura como el de caudal, para ello se emplea la función *map* ya que permite “escalar” de manera lineal las lecturas del sensor de acuerdo al valor de salida deseado.

```
temp = valortemp*10;
voltage = map(temp,min_temp*10,max_temp*10,0,255);
analogwrite(11,voltage);
```

```
lts_HoraD = fmap (lts_HoraD, sensorMin, sensorMax, outMin, outMax);
analogWrite(10, lts_HoraD);
```

Para finalizar, se definieron ciertas apreciaciones en el proceso de conversión digital analógico:

- La resolución de los puertos PWM, al ser de 8-bit hace que su precisión disminuya y se evidencien fluctuaciones mínimas en la medida
- A la hora de hacer la conversión de la señal, se debe tener en cuenta el filtrado y velocidad de respuesta del mismo
- La señal analógica no es del todo pura, para ello se requeriría hardware externo como lo es un DAC de mayor resolución.

#### **4.6 Temperatura tanque principal**

Una vez instalados y encendidos tanto la resistencia térmica como el sensor de temperatura, se obtuvieron varias apreciaciones respecto a la lectura de los valores, se evidenció una buena precisión y respuesta por parte del sensor de temperatura, cabe señalar que el cambio de temperatura es muy tardío (debido a la cantidad de agua y a los bajos niveles de temperatura que se requieren en el sistema) y se recomienda tomar las muestras de medida con intervalos en minutos, también es conveniente que el sensor deba estar próximo a la resistencia térmica para

tener una óptima medición, y se debe tener especial cuidado con la etapa de aislamiento del opto acoplador en el suministro de energía.

#### **4.6.1. Resistencia calorífica**

Para calentar el agua del tanque principal de la planta, se hizo necesario determinar varios aspectos fundamentales para el óptimo funcionamiento de los componentes que integran el sistema hidráulico:

- No conviene que la potencia con que trabaja la resistencia calorífica maneje valores tan superiores.
- Las altas temperaturas no deben deteriorar elementos como la bomba sumergible, mangueras-accesorios y sensor de caudal.
- Los cambios de temperatura varían los valores de la densidad del agua y se ven reflejados en las medidas de presión.

Teniendo en cuenta tales aspectos, se optó por adquirir un calentador básico para peceras, cuya facilidad permite sumergirlo de manera vertical y no requiere de demás componentes, salvo la alimentación con corriente alterna (AC), este sistema de calefacción consiste en un filamento de resistencia eléctrica, la cual está cubierta de arena y están inmersos en un tubo de vidrio o de cerámica, es imprescindible tener en cuenta que debido a los componentes en que está fabricada la resistencia térmica, no está permitido encenderlo por fuera del tanque ni retirar el elemento mientras se está operando, para ello se recomienda desconectarlo y dejarlo en reposo mientras sus componentes se adaptan a la temperatura ambiente.

#### 4.6.2. Lectura y procesamiento de la medida de temperatura

Como la temperatura pertenece a una de las variables fundamentales del agua, se hace indispensable tomar tal medida en el reservorio principal de la planta por medio del sensor de temperatura DS18B20, como se puede apreciar en el numeral 2.1.20.2. del capítulo 1, una de sus cualidades más representativas es que es un sensor digital y es sumergible.

Un aspecto importante a la hora de comenzar a programar el sensor, se debe a que el código de programación requiere del uso de dos librerías (*DallasTemperature* y *OneWire*), las cuales se hacen necesarias descargarlas y posteriormente instalarlas en el grupo de librerías del IDE de Arduino, como se mencionó anteriormente, el sensor al ser digital insta a que el pin encargado de la señal de medida deba ir conectado a cualquiera de los puertos digitales del Microcontrolador ATmega328P, una vez configurada la conexión de la resistencia pull-up y su respectivo voltaje de operación (3V a 5.5V) del sensor DS18B20, se procede a programar y verificar la medida de temperatura.

Instrucciones necesarias para realizar una óptima lectura de la temperatura con el sensor digital:

- Las librerías deben estar incluidas en el código con `#include <OneWire.h>` y `#include <DallasTemperature.h>`.
- Es necesario definir el pin digital al cual va a estar conectada la señal del sensor con la instrucción `OneWire ourWire(7);`
- En el *setup* del programa es importante inicializar el sensor con `sensors.begin();`
- A la hora de programar en el *loop*, se debe preparar el sensor para ejecutar lectura con `sensors.requestTemperatures();`
- Realiza la lectura de la temperatura y la imprime en grados Celsius con `Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0));`



- Se lee e imprime el valor de temperatura en grados Fahrenheit con `Serial.print(sensors.getTempFByIndex(0));`

#### 4.6.3. Sistema de seguridad de temperatura para la bomba sumergible

Se hace indispensable tener encendida la resistencia térmica en ciertos rangos de temperatura del agua, la cual es encargada de calentar el líquido almacenado en el reservorio del sistema. Como la bomba en uno de sus requerimientos, exige que para el óptimo funcionamiento del motor interno, el líquido no deba tener una temperatura cercana a los 30° centígrados, esto obliga a que se realice un aislamiento del circuito de control a la energía que se le suministra a la resistencia térmica (corriente alterna), y que en la etapa de programación del sensor se incluya un operador de comparación *if*, el cual esté condicionado por el valor máximo que pueda soportar la bomba (en este caso 30°), para ello se emplea la instrucción `digitalWrite(opto, HIGH)` encargada de enviar una señal tipo pulso, y con la ayuda del opto acoplador MOC3021 se mantendrá encendida la resistencia térmica entre los rangos de los 18° a 30° centígrados. A continuación se muestra parte del código empleado para enviar el pulso al opto acoplador.

```
if (valTemp>18 && valTemp<35)
{
digitalWrite(opto, HIGH);
}
else
{
digitalWrite(opto, LOW);
}
```

## **4.7. DRIVER A4988 PARA MOTORES PASO A PASO**

Como los motores que emplean las válvulas requieren de un movimiento acorde a las necesidades del usuario y que además proporcionen precisión, es indispensable emplear una etapa de potencia (con altos niveles de voltaje y corriente) tal como un controlador o driver (usualmente un puente H), el cual se encarga de suministrar al motor tanto el voltaje como la corriente para lograr un movimiento adecuado, cosa que el Microcontrolador carece de tales propiedades por trabajar con voltajes y corrientes reducidas.

En el mercado hay un sinnúmero de driver para motores paso a paso, pero los driver más empleados y recomendados (por su capacidad de corriente) para controlar los motores 17HS4401 son los driver A4988. Esta referencia de driver se empleó para el movimiento de los motores por lo sencillo de operar, su costo y la posibilidad de limitar la corriente que se le suministra a las bobinas del motor.

Esta referencia de driver se compone de dos puentes H compuestos por transistores MOSFET, ya que son necesarios para cada canal los cuales van a las bobinas del motor, tal como se ve en la figura 58.

### **4.7.1. Características y ventajas del driver A4988**

Estos controladores traen consigo el chip Allegro A4988, poseen una sencilla placa con 16 pines que facilitan la conexión en cualquier dispositivo. Este tipo de controlador está diseñado usualmente para operar motores paso a paso tanto bipolares como algunos unipolares, generalmente de impresoras 3D caseras, por su alto torque, precisión y su capacidad de soportar 2 Amperios (con disipador) por bobina del motor.

Ventajas del dispositivo:

- Reducido costo y fácil adquisición
- Bajo consumo de voltaje de operación (3V a 5.5V)
- Dimensiones reducidas de los componentes que lo integran
- En propósitos generales, requiere de dos conexiones para la recepción de pulsos.
- Rango de alimentación para el motor a controlar (8V a 35V).
- Compartimiento para ubicar disipador
- Configuración de resoluciones diferentes: paso completo, medio paso, un cuarto de paso, un octavo de paso, y un dieciseisavo de paso.

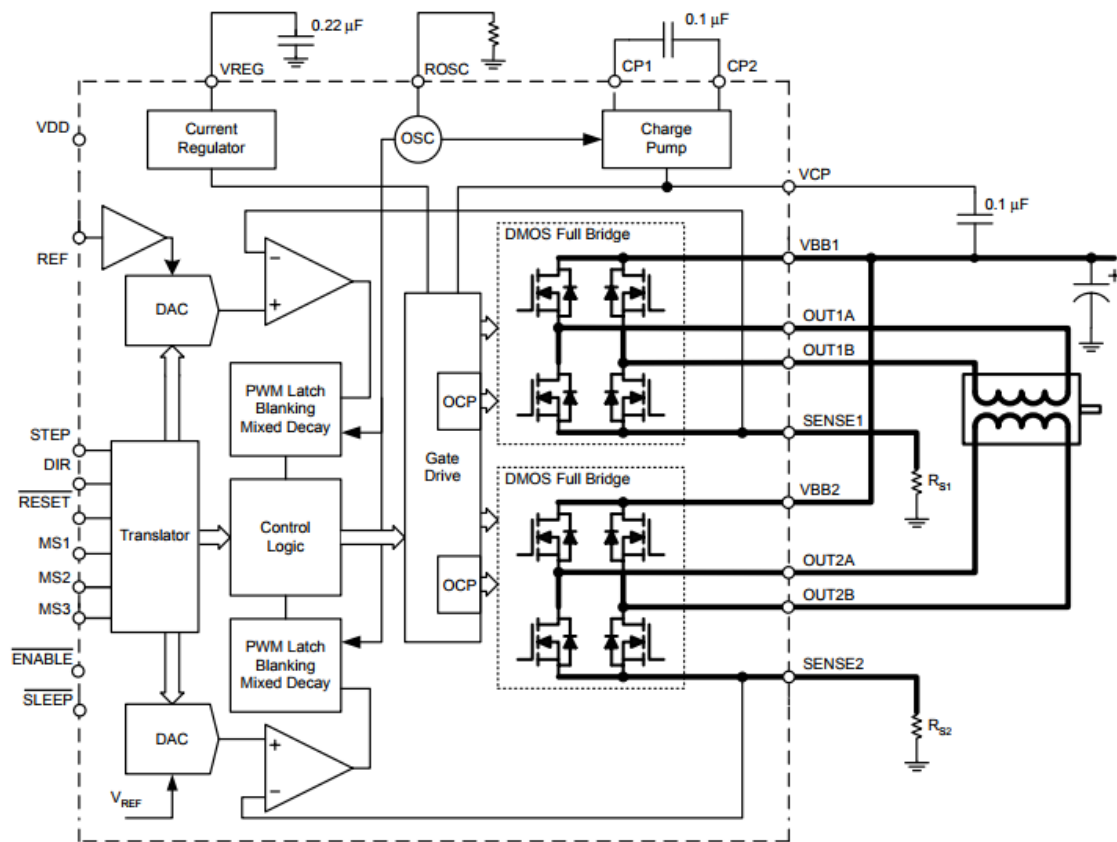


Figura 58 .Diagrama funcional en bloques del A4988, Tomada de

(<https://www.pololu.com/file/0J450/A4988.pdf>)

#### 4.7.2. Precauciones y recomendaciones para su adecuado funcionamiento

El controlador al operar altos niveles tanto de voltaje como de corriente, puede sufrir daños lo cual traiga como consecuencia avería del mismo o que el proceso de control del movimiento sea incorrecto en el motor. Otros aspectos a tener en cuenta que pueden reducir la vida útil del controlador es el de operar de manera inadecuada el proceso de limitación de corriente hacia los motores y también aspectos como el sobrecalentamiento (empleo del disipador) o desconectar terminales mientras el dispositivo está operando.

Para su óptimo funcionamiento se recomienda:

- Al momento de realizar el proceso de limitar la corriente para las bobinas del motor, el driver deberá tener las conexiones que suministran energía al dispositivo (*VCC* y *GND*).
- El cableado proveniente de las bobinas del motor no debe ser desconectado abruptamente mientras los componentes están en funcionando.
- Si el motor requiere en las bobinas una corriente mayor a 1 Amperio es necesario incrustar un disipador al chip principal.
- El voltaje para la alimentación del motor deberá provenir de una alimentación distinta a la del controlador, tal como se observa en la figura 59, y el rango será de 8V a 35V únicamente (dependiendo de las especificaciones del motor).

#### 4.7.3. Configuración y cálculo de la restricción de la corriente

Una de las ventajas de este dispositivo, es que brinda la posibilidad de configurar la intensidad de corriente que pasa por cada bobina del motor, por medio de un reducido potenciómetro unido a la placa, esto posibilita que el usuario tenga una mayor certeza de cuanta corriente se le va a suministrar al motor y así mismo, si el torque del motor será el más indicado.

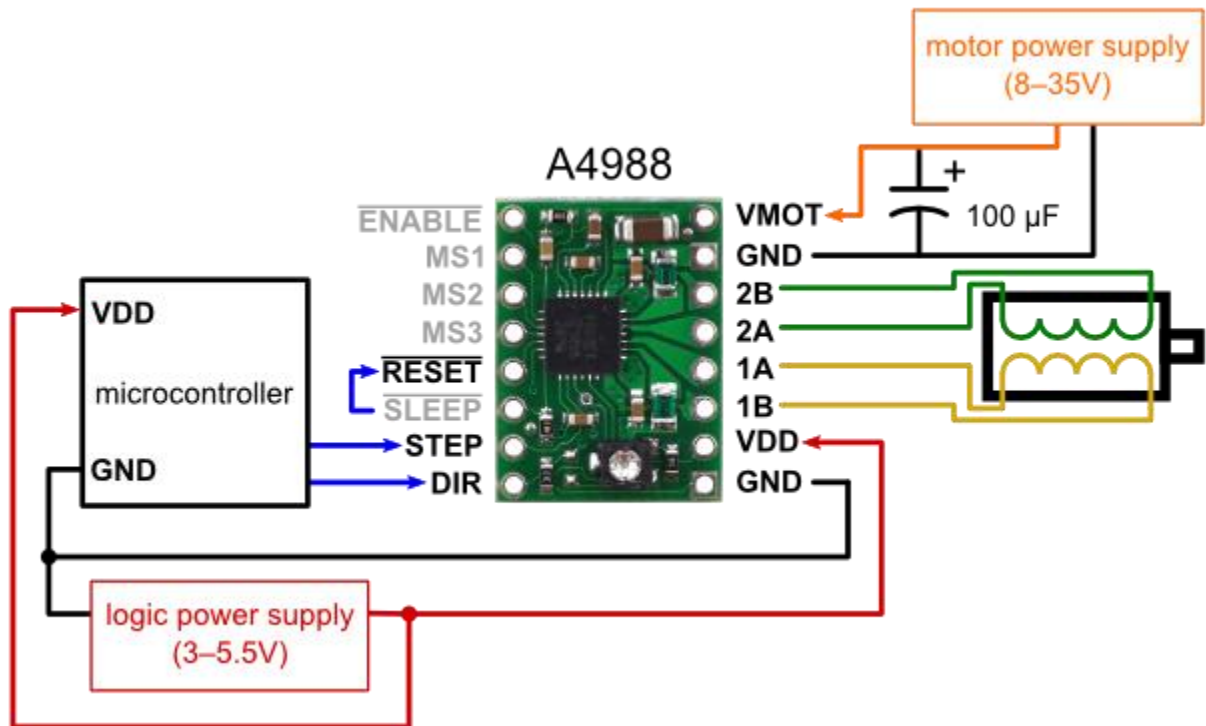


Figura No. 59 Diagrama de conexiones del controlador, Tomada de

(<https://www.pololu.com/product/1182>)

Para el cálculo del valor necesario de la corriente para lograr el torque deseado del motor, y así lograr el movimiento adecuado para la válvula reguladora se debe tener en cuenta el valor de resistencia  $R_s$ , que incluye la placa y la capacidad máxima de corriente que alcanza a soportar el motor (en este caso 1.7 Amperios) y la del driver (2 Amperios) lo cual lo hace suficiente para controlar.

La fórmula que proporciona el fabricante del controlador, para calcular la intensidad de corriente al motor es:

$$V_{ref} = I_{m\acute{a}x} * 8 * R_s * 70\%$$

Donde:

$V_{ref}$  = Voltaje de referencia (potenciometro) (Volts)

$I_{m\acute{a}x}$  = Corriente máxima a suministrar a las bobinas del motor (Amp)

8 = Constante del fabricante

$R_s$  = Resistencia de sensibilidad o sensado ( $\Omega$ )

70% = Porcentaje límite de corriente (modo full step)

Teniendo en cuenta la formula anterior se procede a calcular la corriente óptima para el movimiento de los motores con la válvula reguladora. Al momento de hallar el valor indicado por medio de tanteo, se detalló que la corriente óptima para que el motor logre mover la válvula sin ningún impedimento es de 1.4 Amperios, de esta manera el valor se obtuvo así:

$$V_{ref} = 1.4 \text{ Amp} * 8 * 0.05\Omega * 70\%$$

$$V_{ref} = 0.392 \text{ V}$$

Para el proceso de calibración del potenciómetro limitador de corriente es importante tener en cuenta los siguientes pasos.

- El valor  $R_s$  de la placa varía de acuerdo al fabricante y la fecha de producción del dispositivo (en este caso el valor  $R_s$  del controlador es de  $0.05\Omega$ ).
- El driver no debe estar conectado a ningún elemento salvo la alimentación.
- Tomar la medida entre el potenciómetro y  $GND$  del dispositivo con un voltímetro.
- Girar cuidadosamente el potenciómetro hasta obtener el voltaje calculado.
- Verificar el voltaje calculado el cual debe coincidir con el que se mide en el potenciómetro.

## **4.8. CIRCUITOS DEL SISTEMA**

### **4.8.1. Esquema sensor MPX2050GP.**

Este sensor requiere la implementación de un amplificador operacional de instrumentación, en ambos casos se trabaja un voltaje de alimentación de 10 voltios DC, ya que el sensor requiere una alimentación de este valor y el amplificador también. Para cumplir con esta condición se hizo necesario usar los regulares de voltaje LM7810 y LM7910; los esquemas de funcionamiento de estos regulares se tomaron de la hoja de especificación del elemento. La alimentación proviene de una fuente de voltaje diseñada para suministrar un valor de 12 voltios DC.

La ganancia del amplificador es de  $G=100$  pues los valores emitidos por el sensor de presión están en la escala de milivoltios. El amplificador, requiere para su funcionamiento ser alimentado por voltajes +10v y -10v; el esquema de funcionamiento fue extraído de la hoja de especificaciones del elemento. Hecho lo anterior, la señal ha sido amplificada, dicho resultado se puede observar en el pin que lleva por nombre “PRESIÓN EN VOLTIOS” y está preparada para ser trabajada en el Microcontrolador usando uno de los pines analógicos.

### **4.8.2. Esquema sensor MPX5010GP**

Es requerido usar un regular de voltaje LM7805 para garantizar que la alimentación del sensor de presión sea de 5 voltios DC, el esquema de este regulador fue extraído de la hoja de especificaciones del dispositivo. El fabricante del sensor de presión, recomienda realizar una etapa de filtrado para mejorar la adquisición y respuesta del sensor, en el esquema eléctrico se puede ver que se usan los condensadores c1, c2 y c5 para dicho propósito.

La respuesta del sensor se puede obtener en el pin que lleva por nombre “PRESIÓN EN VOLTAJE”, esta variable se asigna a uno de los pines analógicos del Microcontrolador para su tratamiento.

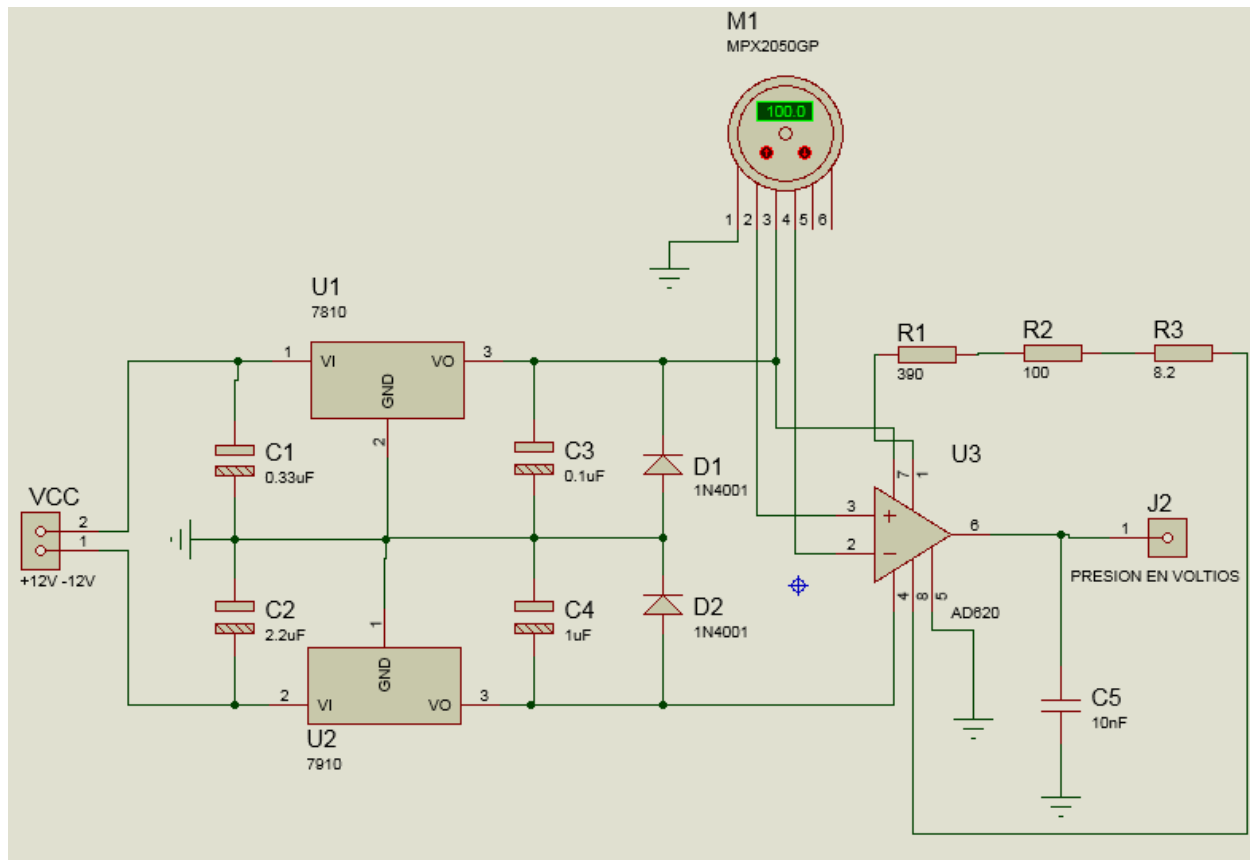


Figura No.60 Esquema eléctrico para el funcionamiento del sensor MPX2050GP.

### 4.8.3. Esquema de conexión motor y driver

El motor paso a paso bipolar requiere de un driver para su movimiento, el modelo A4988 es el más apropiado para este tipo de motores. En un principio se había elegido el driver L293D, desafortunadamente este dispositivo se calentaba demasiado ocasionando efectos colaterales en el motor. El esquema de la figura 62 fue tomado de la hoja de especificaciones del dispositivo. El pin VMOT se trabaja con 12 voltios DC, voltaje suficiente para mover el motor.



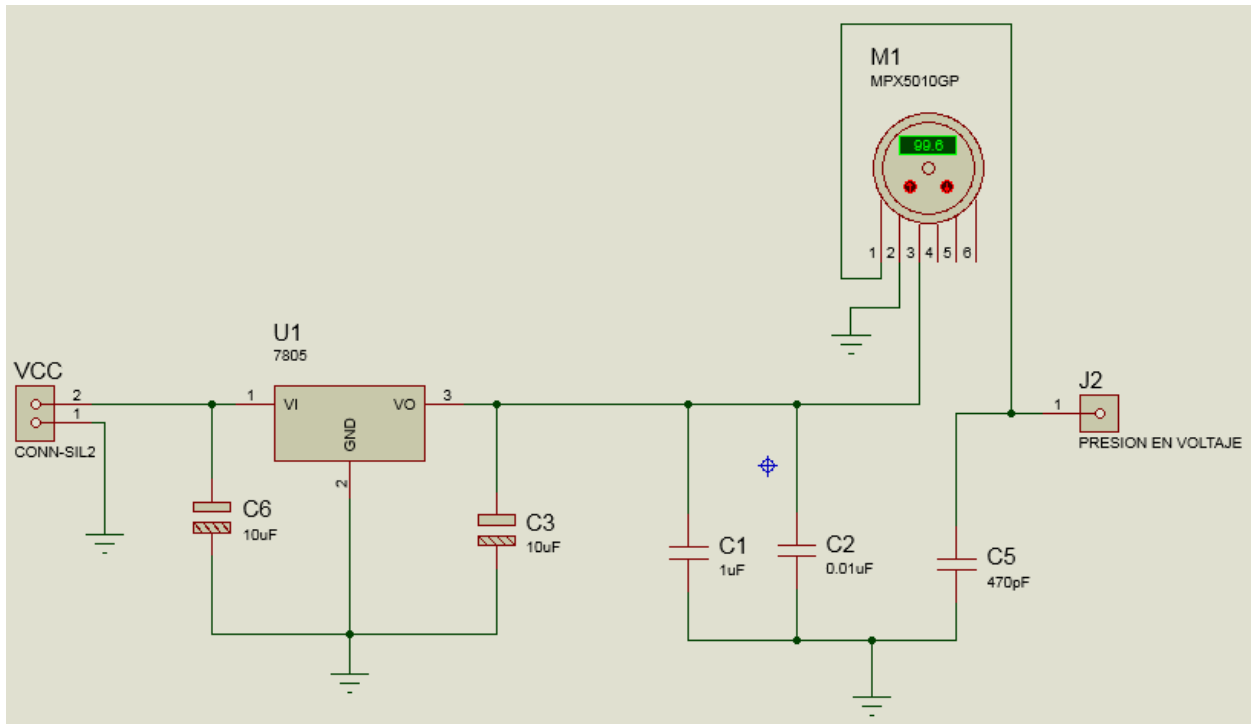


Figura No.61 Esquema eléctrico para el funcionamiento del sensor MPX5010GP.

#### 4.8.4. Sistema de seguridad para la bomba

En el desarrollo del documento se ha sido redundante respecto al tema de protección de la bomba, se ha hablado de una etapa que controla el apagado y encendido respecto a la válvula No 1 y otra etapa concerniente a la temperatura. En la figura 43 se puede observar el circuito empleado, dicho diagrama se usa para el caso del giro de la válvula No 1 y la temperatura máxima permitida.

El Microcontrolador, emite un pulso dependiendo del caso para activar o inhabilitar la bomba hacia el opto acoplador (MOC3021) que se encargara de permitir la circulación de corriente eléctrica. A continuación se menciona el uso del sistema de seguridad.

- Con respecto a la válvula No1. Cuando la válvula impida el flujo de caudal, el Microcontrolador enviara un pulso para que el opto acoplador inhabilite el funcionamiento de la bomba.
- Con respecto a la temperatura del agua. Cuando el sensor de temperatura registre un valor cercano a los 30°C, el Microcontrolador enviara un pulso para que el opto acoplador inhabilite el funcionamiento de la resistencia térmica.

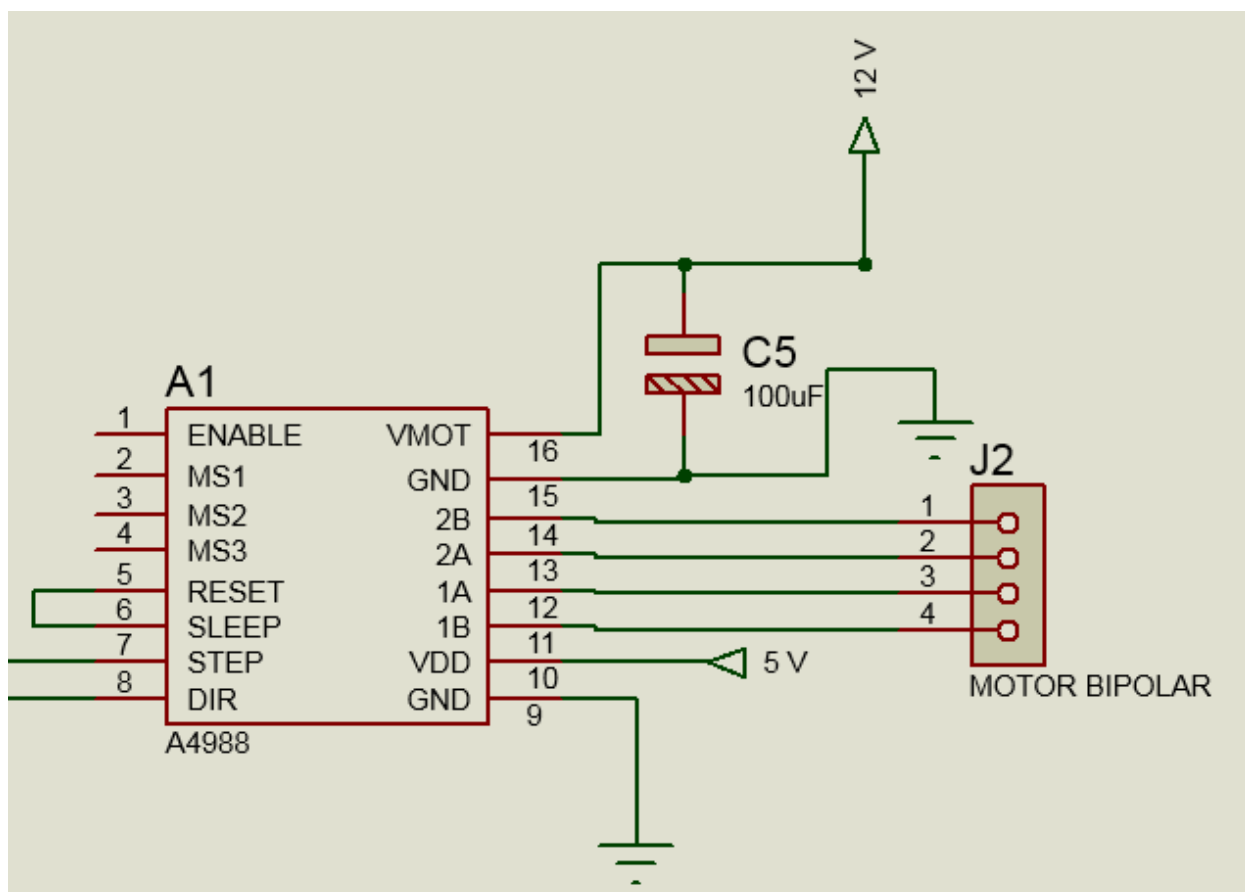


Figura No.62 Esquema eléctrico para el funcionamiento del motor paso a paso bipolar usando el driver A4988.

#### **4.8.5. Esquema de los Microcontroladores.**

Para la adquisición, tratamiento, control y envío de resultados, se usaron 5 Microcontroladores, cada uno con un propósito distinto, tienen en común una configuración semejante para su activación. El pulsador por cada Microcontrolador sirve para resetear el dispositivo cuando se requiera, los demás elementos son dos reguladores LM7805, uno para alimentar a todos los Microcontroladores y el otro para habilitar a los drivers A4988 y demás elementos, un cristal de cuarzo de 16 MHz y dos condensadores de 22 pF.

##### **4.8.5.1. Movimiento de los motores**

Se usan 3 Microcontroladores, uno para cada motor. En el primer caso (figura 63), el esquema hace alusión a la válvula No1 en conjunto con el motor. Se usan los pines del chip ATmega328p: A0 para ingresar el voltaje que controlara el movimiento del motor dependiendo del caso, D12 para enviar el pulso de activación al opto acoplador y así permitir el funcionamiento de la bomba, D9 y D10 enviaran señales tipo pulso (PWM) al driver para controlar el giro y el sentido del eje del motor. El esquema de la imagen 63 es el mismo para los dos motores restantes pero con la excepción de que en estos no se usa el pin D12.

##### **4.8.5.2. Sensores de presión.**

Los pines del ATmega328p que se usan para adquirir las señales provenientes de los sensores de presión son los analógicos: A0 para el sensor del tanque A, A1 para el sensor del tanque B y A2 para el sensor de presión de salida de la bomba.

Los pines de salida digital (PWM) son: D3 para el sensor del tanque A, D5 para tanque B y D6 para el sensor de presión de salida de la bomba.

Las salidas D3, D5 y D6 son pulsos que deben pasar por una etapa de conversión digital – analógico, para poder ser trabajados como voltajes DC. La figura 66 muestra la etapa DAC (Digital-to-Analog Conversión).

Culminado este proceso, se pueden acoplar estas salidas a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos “national instruments” o el sistema diseñado para realizar la adquisición y control de las variables.

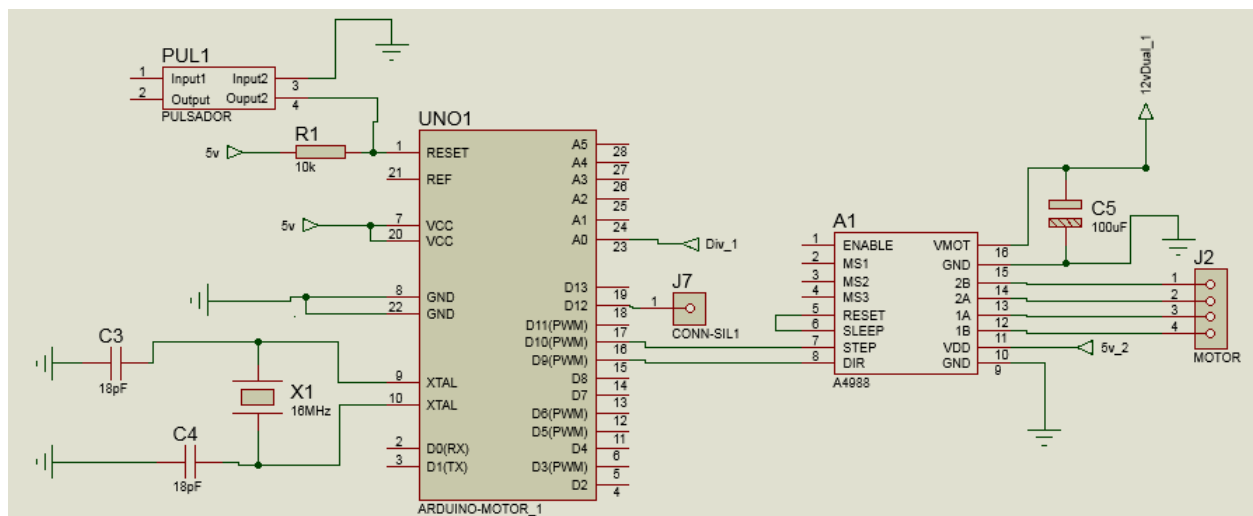


Figura No.63 Esquema del control del giro del motor usando microcontrolador ATmega328P.

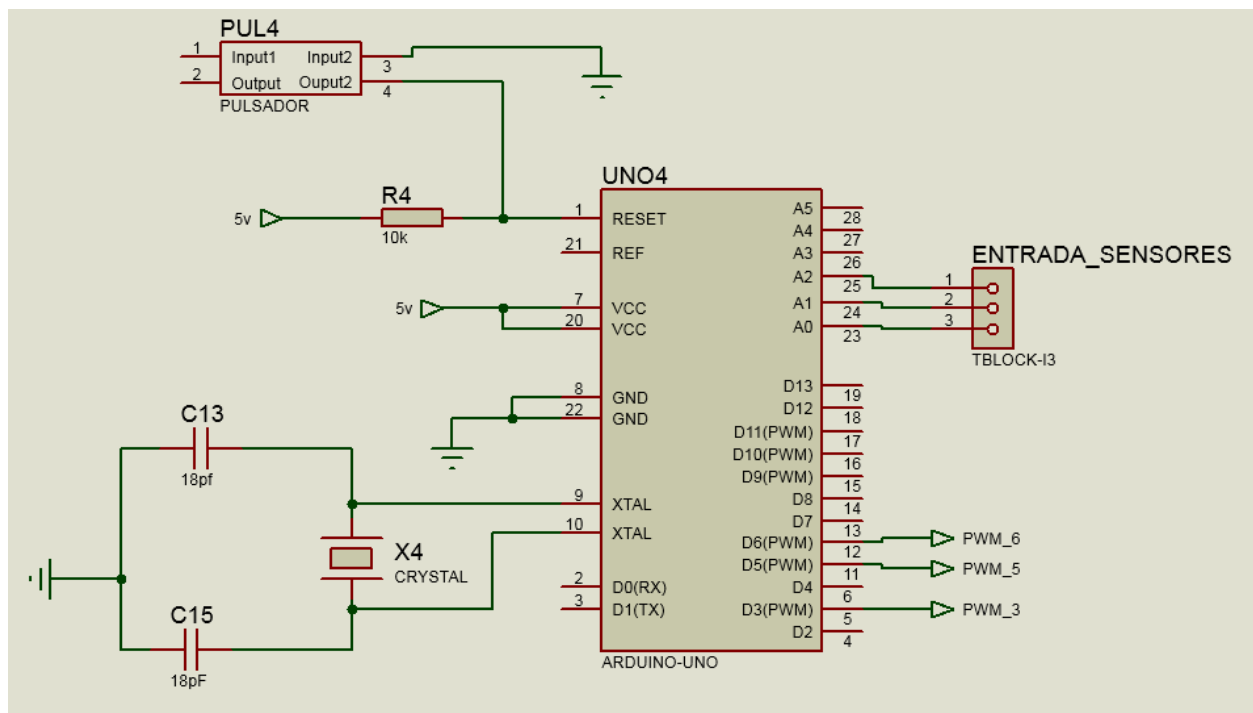
#### 4.8.5.3. Sensores de temperatura y caudal.

Los pines del ATmega328p que se usan para adquirir las señales provenientes de los sensores de caudal y temperatura son los digitales: D2 para el caudal y D4 para la temperatura.

Los pines de salida digital (PWM) son: D10 para la variable caudal y D11 para la variable temperatura.

Las salidas D10 y D11 son pulsos que deben pasar por una etapa de conversión digital – analógico, para poder ser trabajados como voltajes DC. La figura 66 muestra la etapa DAC (Digital-to-Analog Conversión).

Culminado este proceso, se pueden acoplar estas salidas a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos “national instruments” o el sistema diseñado para realizar la adquisición y control de las variables.



*Figura No.64 Esquema para la adquisición de las variables de presión usando microcontrolador ATmega328p.*

#### 4.8.6. Conversión digital –analógico.

La salida PWM del Microcontrolador ATmega328p pasa por un filtro pasa bajos (Resistor 4.7K y capacitor 100uF) y luego esa tensión se ubica en la entrada no inversora del

amplificador. Esta configuración de DAC, posee una resolución de 8 bits. El amplificador es de la referencia LM358, es alimentado con 12 voltios DC, se configuro para generar una ganancia de 2 a la salida.

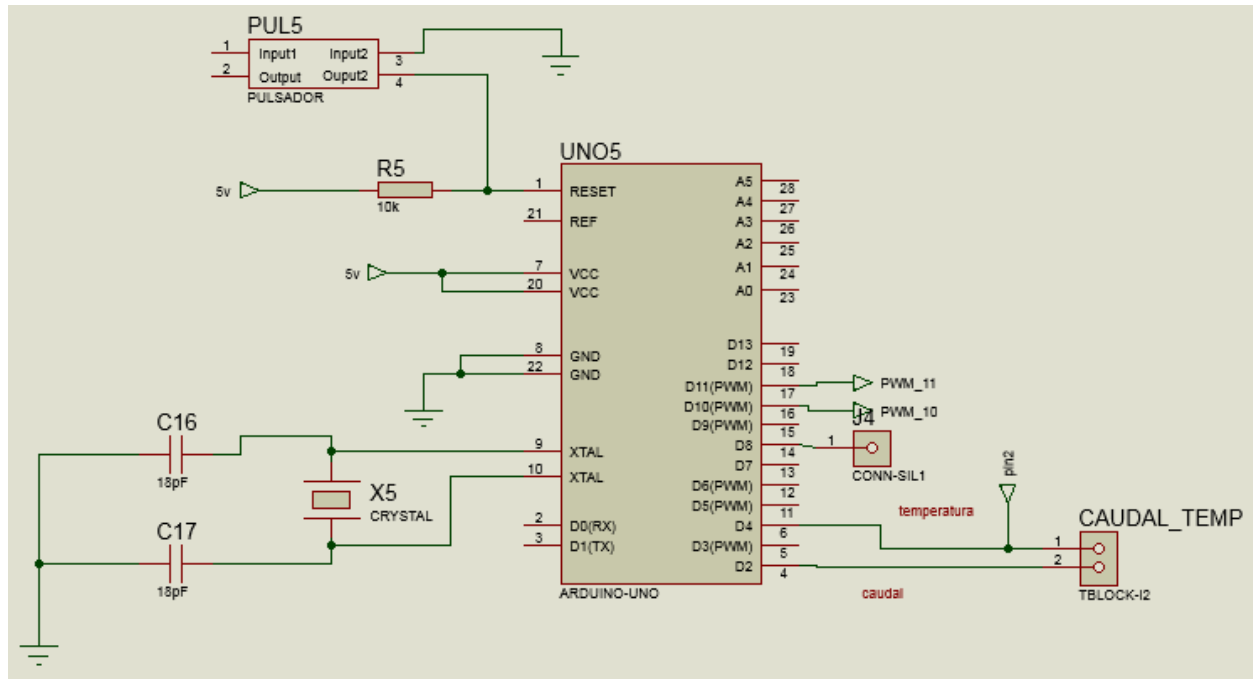


Figura No.65 Esquema para la adquisición de las variables de temperatura y caudal usando microcontrolador ATmega328p.

#### 4.8.7. Regulares de voltaje

Este circuito es el que recomienda la hoja de especificaciones del regulador LM7805. El voltaje de entrada es de 12 voltios DC ya que hay elementos que requieren esa alimentación, así que se bifurca esta señal para que vaya directo al regulador quien se encargara de emitir un voltaje de 5 voltios DC.

#### 4.8.8. Fuente de voltaje dual.

La fuente simétrica regulada, es un circuito especialmente diseñado para alimentar circuitos que requieren voltajes estables y sin fluctuaciones. Esta fuente proporciona 12 voltios DC por sección (-12v y +12v con TAP central o punto cero), en este caso se usa los regulares LM7812 y LM7912, con un consumo de hasta 2Amp, dependiendo del transformador que se le coloque a la entrada AC.

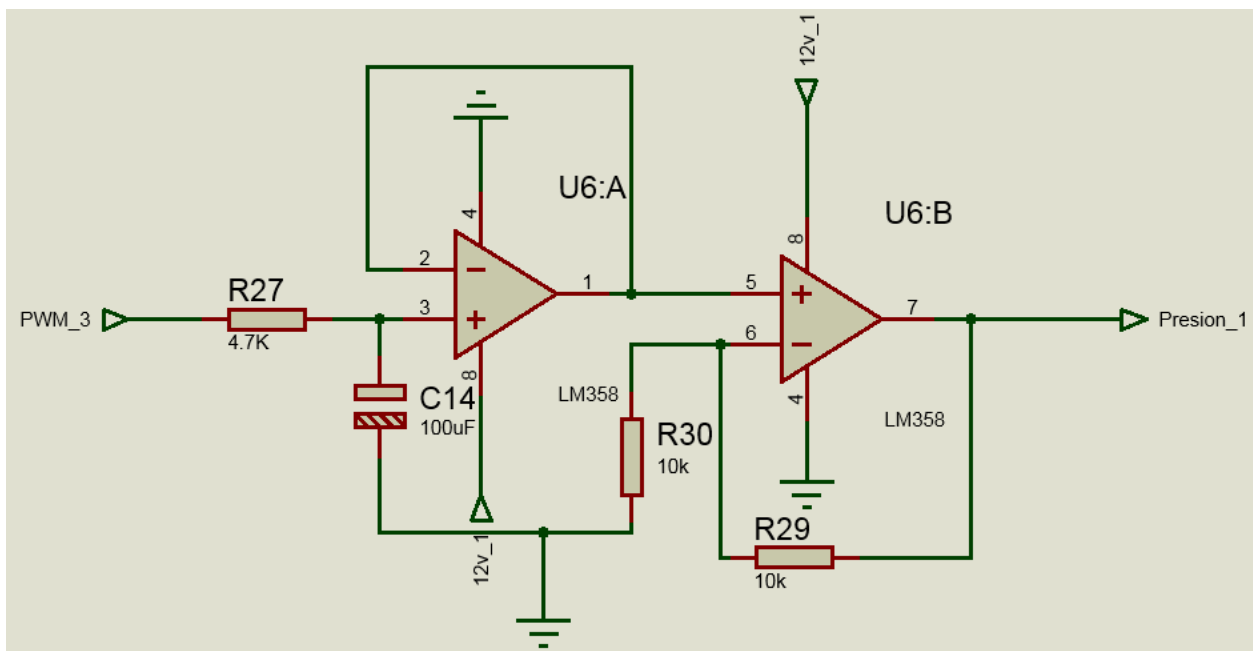


Figura No.66 Esquema conversor Digital – Analógico usando el Amplificador LM358

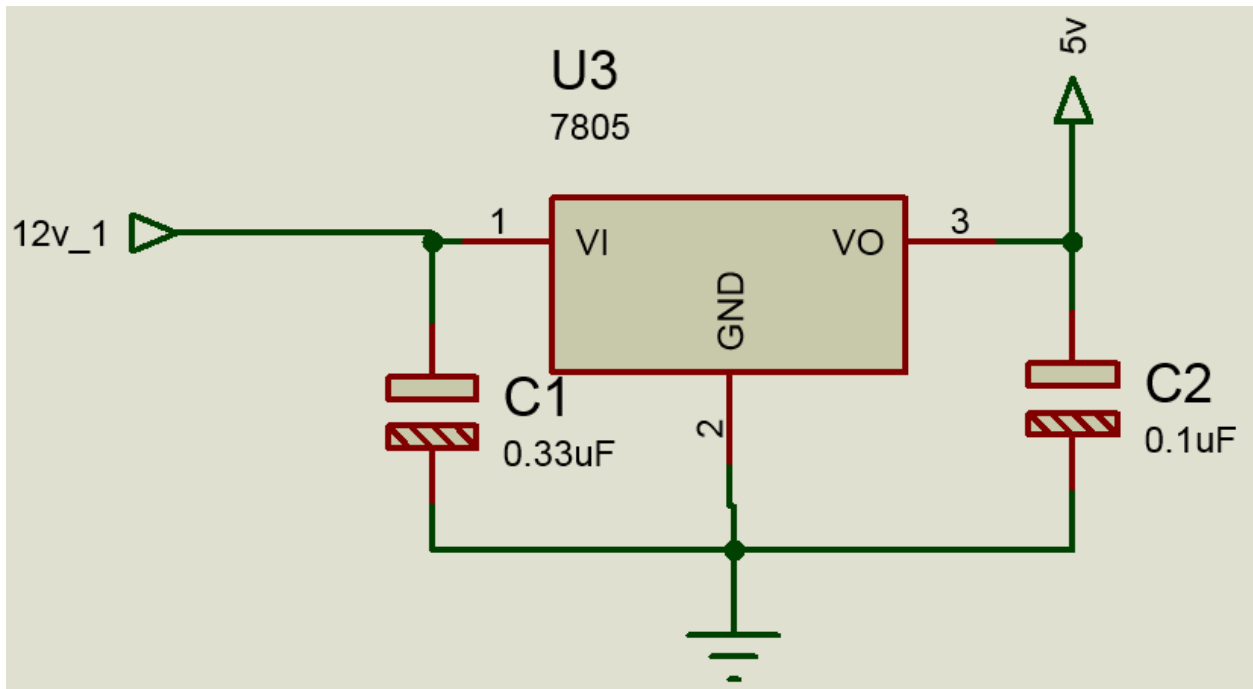


Figura No.67 Esquema regulador de voltaje LM7805.

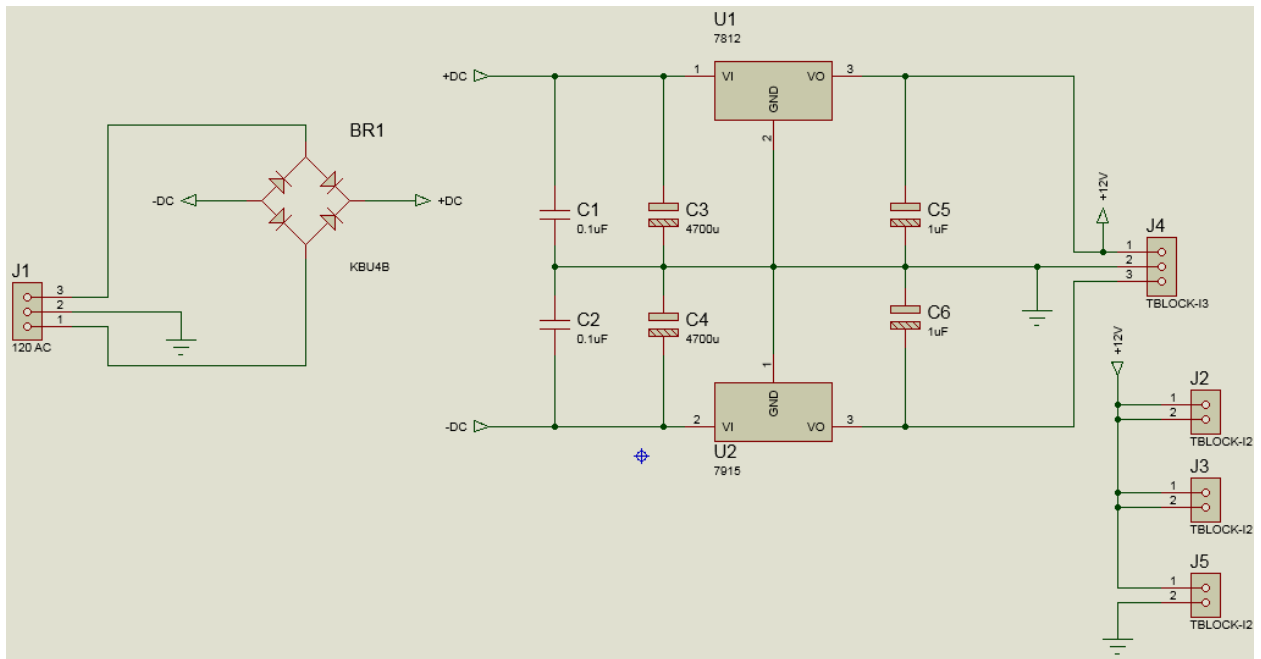
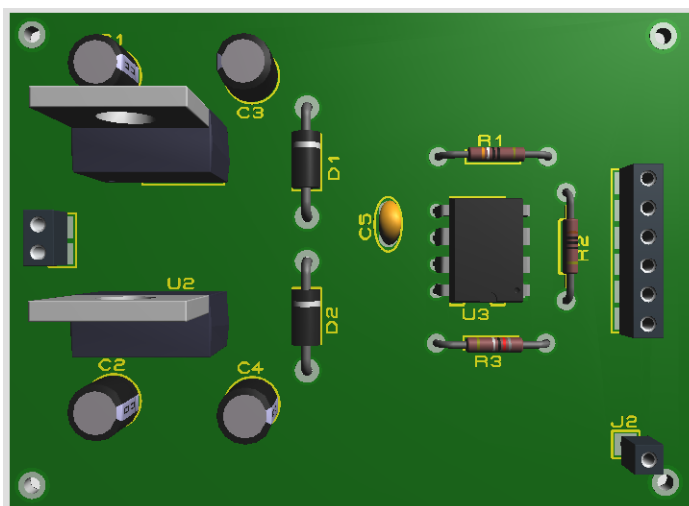


Figura No.68 Esquema eléctrico para la fuente de voltaje dual +12V y -12V.



#### 4.9. DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Se hizo menester diseñar el circuito impreso para los sensores de presión y la fuente de voltaje dual, debido que a los puntos donde se deben tomar las muestras en el caso de presión, debe estar cerca al punto donde se realiza la toma de datos. El proceso se desarrolló realizando lo que en el contexto de electrónica se conoce como “quemado de circuito impreso”. Primero se cortaron trozos de una lámina de cobre de 20X20 para luego recortarla dependiendo de la medida de cada circuito, luego se aplicó esponja de brillo para eliminar las huellas y demás marcas en el cobre, por último se realizó la transferencia del circuito impreso usando papel termotransferible y plancha. El diseño de cada circuito fue realizado en el software Proteus 8.



*Figura No.69 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX2050GP hecha en Proteus 8, vista superior.*

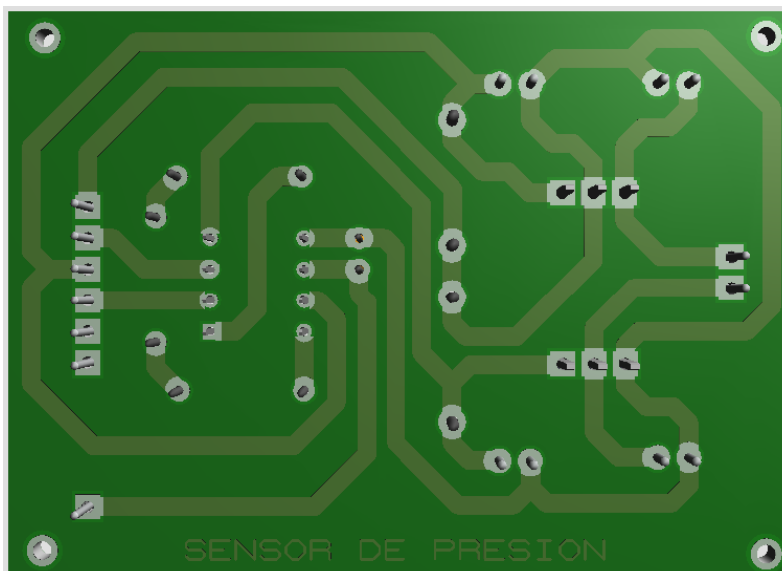


Figura No.70 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX2050GP hecha en Proteus 8, vista inferior.

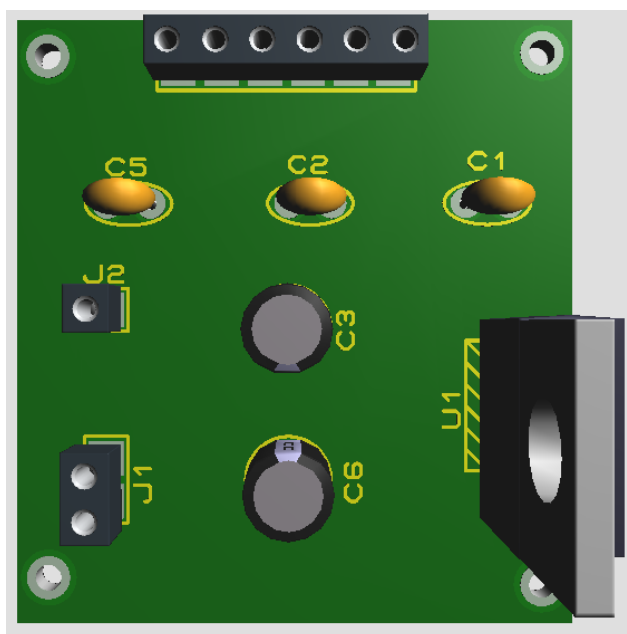
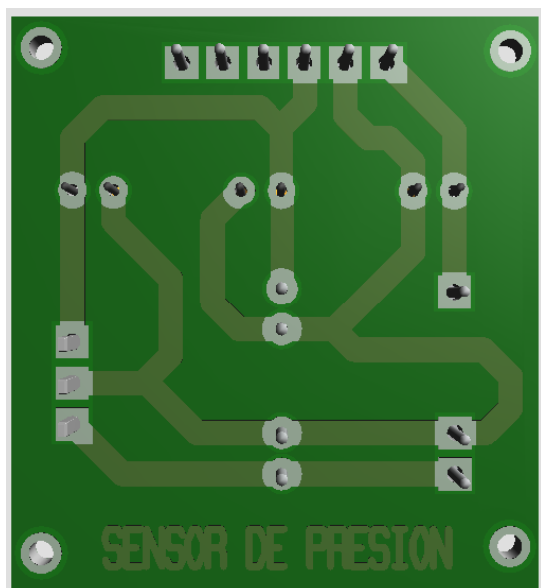
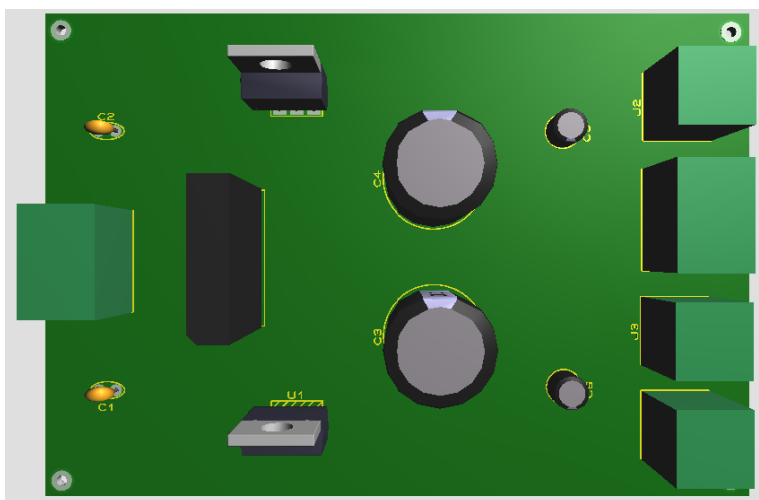


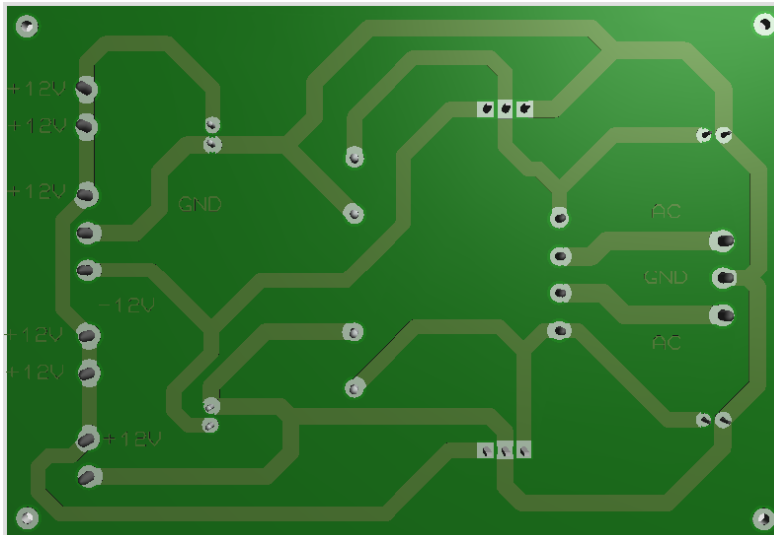
Figura No.71 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX5010GP hecha en Proteus 8, vista superior.



*Figura No.72 Circuito impreso para el funcionamiento del sensor MPX5010GP hecha en Proteus 8, vista inferior.*



*Figura No.73 Circuito impreso para el funcionamiento de la fuente dual hecha en Proteus 8, vista superior.*



*Figura No.74 Circuito impreso para el funcionamiento de la fuente dual hecha en Proteus 8, vista inferior.*

#### **4.10. Ubicación de los elementos.**

Cada elemento se ubicó de manera que se pueda aprovechar el mayor espacio posible, también se pensó en disminuir el riesgo eléctrico ya que se está usando agua en el sistema por lo que el riesgo es algo, además se organizó el cableado de tal forma que su uso no fuera excesivo es muy importante tener en cuenta las pérdidas relacionadas con la resistencia inherente al cobre para largos recorridos. Todo el cableado está cubierto de canaletas.

La trayectoria que sigue el líquido es la siguiente:

- La bomba sumergible se encarga de succionar el agua contenida en el recipiente principal, impulsa el líquido en dirección vertical hacia arriba. Su funcionamiento está condicionado dependiendo del grado de apertura de la válvula No1, pues su apagado no es automático, así que cuando la válvula impide el flujo de caudal, la bomba debe ser apagada para evitar daños en la misma. Lo anterior es posible implementando una etapa

de seguridad con opto acoplador (MOC3021), que está asociado al Microcontrolador que controla el giro de la válvula No 1.

- El circuito impreso que permite el funcionamiento del sensor MPX5010GP está sujeto a la estructura en la parte superior, se usaron abrazaderas y no tornillos pues no es apropiado averiar la estructura, además es fácil de remover en dado caso que se requiera. El riesgo de contacto con el agua es mínimo pues la boquilla del sensor, está muy bien sujeta a la manguera que conecta a la manguera principal del sistema.
- El dúo Válvula No1 y Motor, fue posible uniendo el eje del motor a un disco de plástico por medio de calor y pegamento para reforzar, se usaron abrazaderas que sujetan el disco a la manivela de la válvula, pudiendo de esta forma controlar el giro de la misma. La coexistencia de estos elementos fue analizada y se hicieron varios prototipos que fracasaron sobre todo por el torque del motor, pues posee demasiada fuerza y su sujeción es complicada, por lo tanto fue confinado a un bloque que impide el movimiento del cuerpo de este y no su eje. Este procedimiento es el mismo para las dos parejas restantes. Su objetivo es regular el caudal que ingresa al tanque A por lo que esta pareja fue ubicada en la parte superior de la planta.
- Los tanques A y B tiene un acceso en común (vasos comunicantes) por medio de la válvula No 2, cuyo propósito es regular el nivel del líquido dependiendo de la situación.
  - Se puede regular el nivel del líquido del tanque A vaciándolo por medio del conducto en común con el tanque B. El fluido del tanque A pasa al tanque B.
  - Se puede regular el nivel del líquido del tanque B controlando el flujo proveniente del tanque A.

- Se puede regular el nivel del líquido del tanque B, regulando el grado de apertura de la válvula No 3.
- La resistencia térmica debe estar siempre sumergida en el recipiente que contiene a la bomba, su temperatura no cambia instantáneamente y además se incluyó una etapa de seguridad usando un opto acoplador (MOC 3021) para evitar que el agua sobrepase la temperatura máxima permitida para el funcionamiento de la bomba. El sensor DS18B20 está ubicado al interior del tanque principal, su función es sensar el cambio de temperatura del líquido.
- El circuito que permite el funcionamiento del sensor MPX2050GP está ubicado a una distancia apropiada para minimizar el riesgo eléctrico, la manguera que comunica a los tanques con el sensor se ubicó a una distancia prudente para que los datos de medición sea fiables. Esta adherido a la estructura usando abrazaderas para que en dado caso de remoción no se maltraten los demás elementos.
- El circuito para todo el sistema está ubicado en la base de la estructura, comparte espacio con el tanque de almacenamiento principal. Está cubierto por una caja hecha en acrílico que funciona como membrana para evitar el ingreso de líquido, posee ranuras de acceso de cableado y orificios para la adquisición de datos por parte del usuario. Todo el cableado llega a este punto y desde aquí sale un cable que se encarga de prender todo el sistema.

#### 4.11. Estructura final del sistema



*Figura 75 vista frontal de la estructura final*

## **CAPITULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS**

Una vez diseñada y construida tanto la estructura del sistema hidráulico, junto con sus accesorios (mangueras, acoples y válvulas) y los componentes electrónicos listos a poner en marcha como lo son: sensores con su señal acondicionada, Microcontroladores programados y actuadores del sistema, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento y observar tanto el comportamiento como los resultados de las señales medidas.

### **5.1 Software y hardware para la adquisición y procesamiento de las señales**

Teniendo en cuenta las propiedades de las señales y su comportamiento, se concluye que el software propicio para poder tratar las señales de los sensores y el accionamiento de los actuadores es la versión estudiantil de LabVIEW, por el sinnúmero de funcionalidades e interfaz de programación gráfica; a su vez, el hardware para la adquisición de señales y procesamiento de las mismas, fue la tarjeta NI-6008 por su total funcionalidad con las propiedades de LabVIEW y capacidad de leer varias señales simultáneamente.

#### **5.1.1. Dispositivo para la adquisición de señales acondicionadas**

El sistema de adquisición de datos más indicado, tanto para leer como para procesar las señales, fue la tarjeta de adquisición de *National Instruments* NI-6008, debido a sus especificaciones, fácil operación y conectividad USB para sincronizarla a cualquier computadora. Este dispositivo tiene como ventaja la posibilidad de emplearlo en distintos software de ingeniería, relacionados con los sistemas de adquisición de datos (LabVIEW y Simulink, entre otros), en este caso se optó por emplear el software NI LabVIEW 2013 por su



interfaz gráfica, programación simplificada en bloques y completa compatibilidad con de todas las funcionalidades y propiedades que proporciona la tarjeta NI-6008.



*Figura No. 76 Tarjeta de adquisición de datos NI 6008, Tomada de (<http://www.sascha.uni-saarland.de/sascha2007/pics/image050.jpg>)*

Para hacer el proceso de adquisición es necesario conocer las especificaciones del dispositivo:

- Proporciona la funcionalidad de adquisición de datos necesaria para monitoreo de datos, mediciones móviles y uso experimental académico.
- Posee 8 canales de entradas analógicas (individuales) o 4 entradas diferenciales, con resolución de 12 bits  $\pm 10V$  DC.
- Empleo de medidas en voltaje-corriente DC.
- Conectividad y energizado por medio de la interfaz USB (5V – 500mA).
- 2 salidas analógicas con 12 bits de resolución (0V a 5V).
- 12 Entradas/Salidas digitales bidireccionales.
- Compatible con cualquier software de LabVIEW.

### 5.1.2 Uso de NI LabVIEW 2013

Como se mencionó anteriormente, se optó por emplear el software LabVIEW para la adquisición y procesamiento de señales. Este software es una poderosa plataforma de desarrollo de proyectos y diseño de sistemas con una interfaz de programación gráfica, este software se emplea generalmente para trabajar con sistemas de control industrial, tanto en hardware como en software, y en el ámbito de la instrumentación industrial con adquisición de datos.

Propiedades del software:

- Trabaja con múltiples interfaces de comunicación: Serial, paralelo, TCP/IP, Bluetooth, USB, entre otros.
- Ofrece la posibilidad de trabajar con otros lenguajes y entornos.
- Posibilita la conectividad con distintos módulos.
- Emplea diversas utilidades tanto gráficas como textuales para el procesamiento de señales.

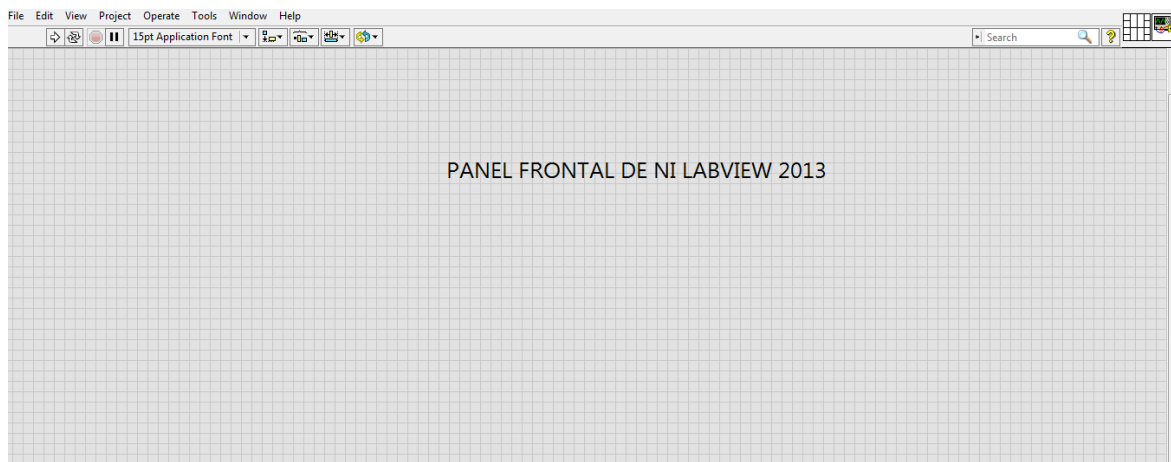
LabVIEW requiere de ciertos requisitos en la computadora, para que éste funcione de manera adecuada:

- Procesador de 32 ó de 64 bits, Pentium 4M o Pentium 4 G1 o superior.
- Memoria RAM de 1GB o superior.
- Trabaja con sistema operativos Linux, Windows o Mac OS.
- 5GB de espacio libre en disco duro

### 5.1.2.1. Descripción de las herramientas y elementos que posee LabVIEW

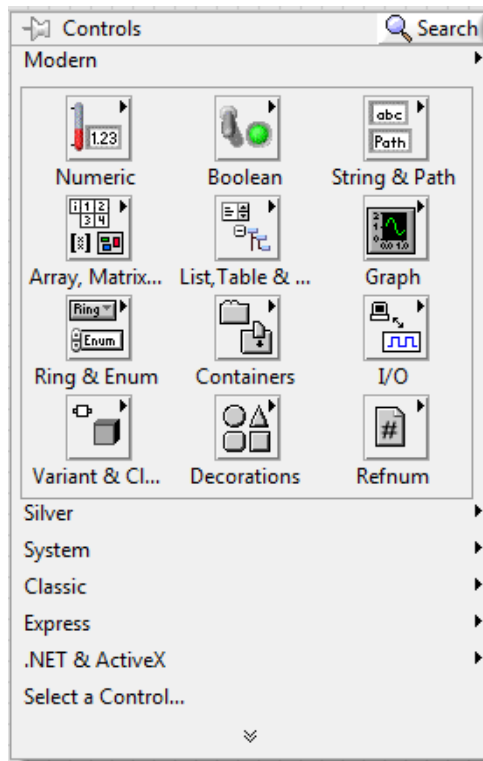
A la hora de emplear el software, se hace indispensable conocer y tener nociones de uso sobre las herramientas y componentes que constituyen el software. A continuación se hará una breve descripción de tales herramientas.

- Panel frontal: Aparece cuando se abre un nuevo proyecto de LabVIEW o uno existente. Este panel es la interfaz de usuario para el desarrollo del proyecto. Está compuesto por una barra de herramientas y el panel para plasmar las herramientas de control del programa.



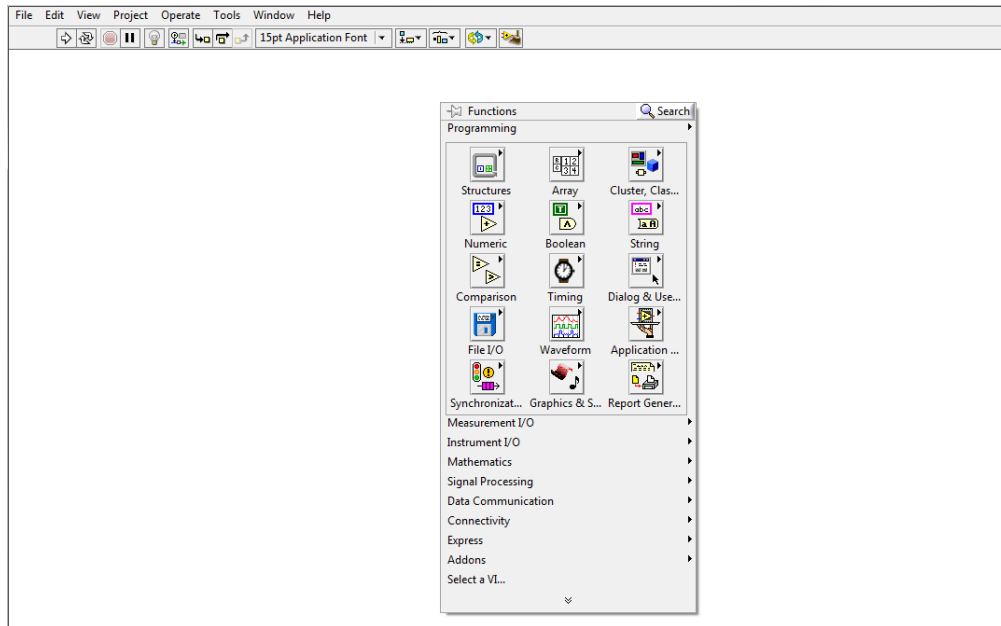
*Figura No. 77 Panel frontal LabVIEW 2013*

- Paleta de controles: Como su nombre lo dice, se encarga de ofrecer al usuario los diversos controles e indicadores los cuales están segmentados de acuerdo a su función y propiedades, éstos deben ser introducidos en el panel frontal del software.



*Figura No. 78 Paleta de controles del panel frontal*

- Panel de programación y paleta de funciones: Allí se ubicarán todos los bloques y funciones que fundamentan el programa, el panel requiere del uso de la paleta de funciones, ya que su función consiste en proporcionar los elementos para la programación por bloques, se encuentran distintas herramientas esenciales para la programación y están clasificadas de acuerdo a sus propiedades y utilidad.



*Figura No. 79 Paleta de controles del panel de programación*

## 5.2. Pruebas y comportamientos de los sensores

En esta sección se describirán los resultados obtenidos respecto a las medidas de presión, nivel, caudal y temperatura que están presentes en el sistema, junto con las señales a ser procesadas en el sistema de adquisición de datos.

Las pruebas se dividieron en dos etapas:

- Resultados de las lecturas de los sensores presentes en el sistema
- Tratamiento de las señales empleadas en el sistema de adquisición de datos

### 5.2.1. Resultados de las lecturas de los sensores presentes en el sistema

Como primera etapa, y punto en común de los sensores que hay en el sistema es que se empleó inicialmente la herramienta de puerto serial, para apreciar las medidas y voltajes (en el caso de ser analógicos) que registran los sensores.

```

PresionA: 2.220 KPa  0.322 PSI
*** Sensor (C)= MFX_2050 ***
VoltajeC =>  0.831
PresionC: 10.389 KPa  1.507 PSI

*** Sensor (A)= MFX_5010 ***
VoltajeA =>  1.268
PresionA: 2.351 KPa  0.341 PSI
** Sensor (B)= MFX_5010 **
VoltajeB =>  1.212
PresionA: 2.228 KPa  0.323 PSI
*** Sensor (C)= MFX_2050 ***
VoltajeC =>  0.835
PresionC: 10.438 KPa  1.514 PSI

*** Sensor (A)= MFX_5010 ***
VoltajeA =>  1.296
PresionA: 2.412 KPa  0.350 PSI
** Sensor (B)= MFX_5010 **
VoltajeB =>  1.216
PresionA: 2.236 KPa  0.324 PSI
*** Sensor (C)= MFX_2050 ***
VoltajeC =>  0.809
PresionC: 10.119 KPa  1.468 PSI

*** Sensor (A)= MFX_5010 ***
VoltajeA =>  1.310
PresionA: 2.443 KPa  0.354 PSI
** Sensor (B)= MFX_5010 **
VoltajeB =>  1.218
PresionA: 2.241 KPa  0.325 PSI
*** Sensor (C)= MFX_2050 ***
VoltajeC =>  0.810
PresionC: 10.123 KPa  1.468 PSI

*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.25 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 0 L/hora -- Litros: 27.45
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.19 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 103 L/hora -- Litros: 27.48
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.12 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 233 L/hora -- Litros: 27.55
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.06 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 519 L/hora -- Litros: 27.70
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.06 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 753 L/hora -- Litros: 27.93
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 24.00 Å°C

*** Sensor (D)= YF-S201 ***
Caudal: 294 L/hora -- Litros: 28.02
*** Sensor (E)= DS18B20 ***
Temperatura: 23.94 Å°C

```

*Figura No. 80 Captura de las medidas de cada sensor por medio del puerto serial del Microcontrolador*

### 5.2.1.1 Resultados de los sensores analógicos

Los resultados que arrojaron los sensores de presión de los tanques A y B concluyeron que efectivamente su respuesta es lineal, además hay correspondencia con la calibración (ecuación del voltaje de salida del sensor) y la gráfica de respuesta por parte del sensor de presión que proporciona el fabricante.

Tanque A:

En la siguiente tabla se pueden apreciar, los rangos de valores tanto en voltaje como en presión medidos: cuando el tanque A no tuvo presencia del líquido, posteriormente cuando se llenó a la mitad de capacidad y por último cuando su capacidad se completó, estos fueron de:

| Valores medidos tanque A con capacidad nula, media y completa: |           |        |
|--|-----------|--------|
| Voltaje  | Presión   | Altura |
| 0.19 V   | 0.005 kPa | 0 cm   |
| 0.60 V   | 0.916 kPa | 12 cm  |
| 1.01 V   | 1.846 kPa | 24 cm  |

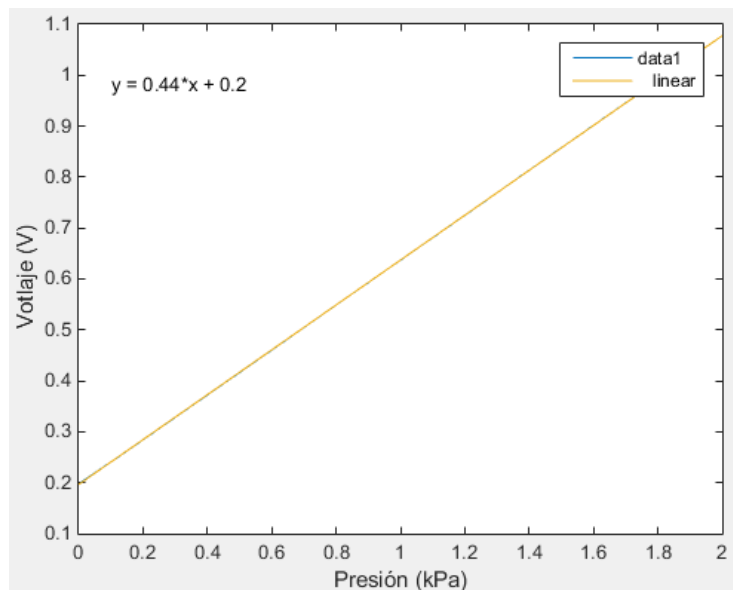
Tanque B:

Se esperaría que los valores medidos tanto de voltaje como en presión en este tanque fueran en cierta medida idénticos a los del tanque A pero se notó una minúscula variación, esto es, a que no todos responden de la misma manera y las condiciones de conexión (boquilla-manguera) al tanque también influyen.

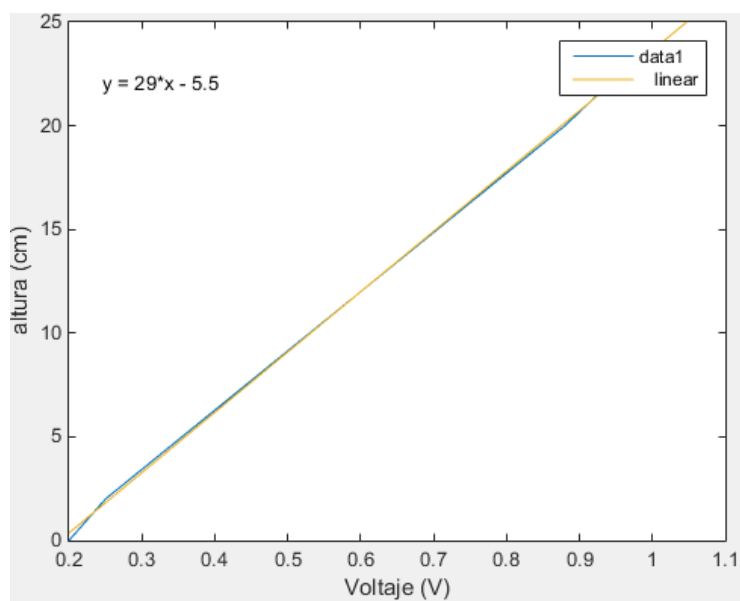
| Valores medidos tanque B con capacidad nula, media y completa: |           |        |
|--|-----------|--------|
| Voltaje  | Presión   | Altura |
| 0.2 V  | 0.008 kPa | 0 cm   |
| 0.59 V   | 0.893 kPa | 12 cm  |
| 1.02 V   | 1.868 kPa | 24 cm  |

Para conocer detalladamente el comportamiento del voltaje que proporcionan los sensores de presión (tanques A y B) de acuerdo a la altura de la columna de agua. Se tomaron muestras tanto de voltaje como de presión y de allí se graficaron dos respuestas:

Respuestas del tanque A:



*Figura No. 81 Respuesta de las muestras en voltaje y en presión del tanque A*



*Figura No. 82 Respuesta de las muestras en voltaje y altura del tanque A*



Respuestas del tanque B:

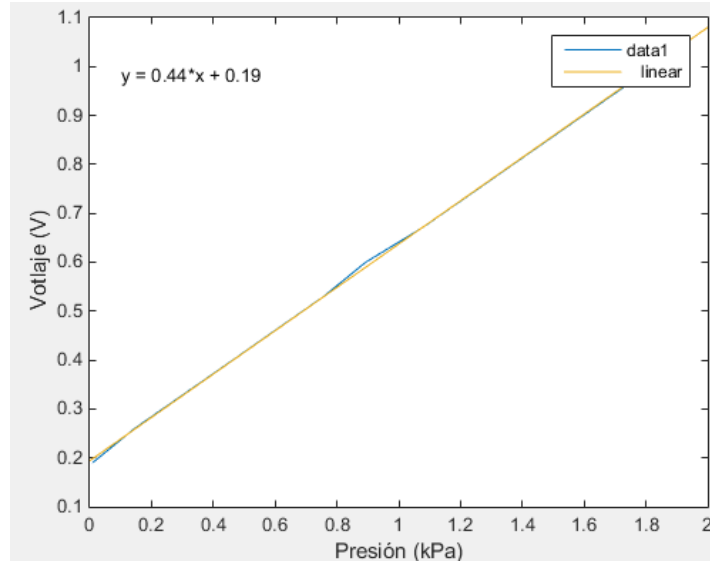


Figura No. 83 Respuesta de las muestras en voltaje y en presión del tanque B

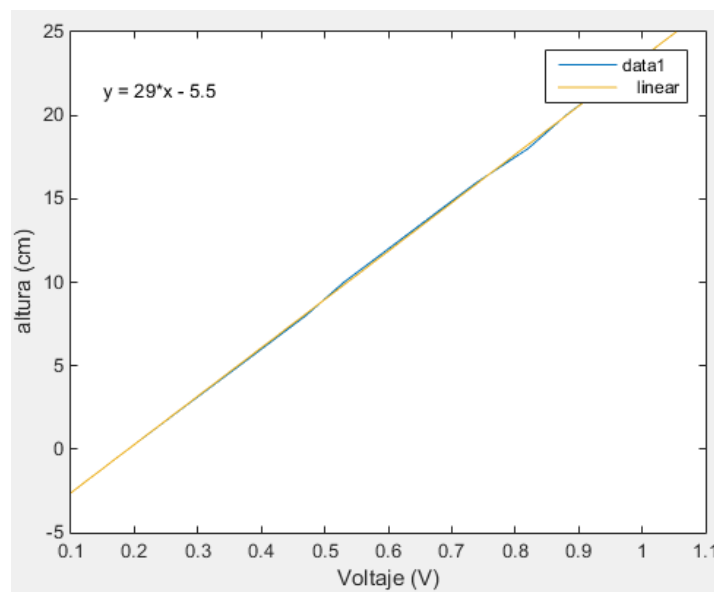


Figura No. 84 Respuesta de las muestras en voltaje y altura del tanque B

### 5.2.2. Tratamiento de las señales empleadas en el sistema de adquisición de datos

La segunda etapa corresponde a las señales amplificadas de cada uno de los sensores presentes en el sistema, estas señales requieren ser llevadas a un sistema computarizado para así procesarlas, con la ayuda de la versión de prueba de LabVIEW y el sistema de adquisición NI-6008, se programó la siguiente rutina para leer la señal acondicionada de cada sensor.

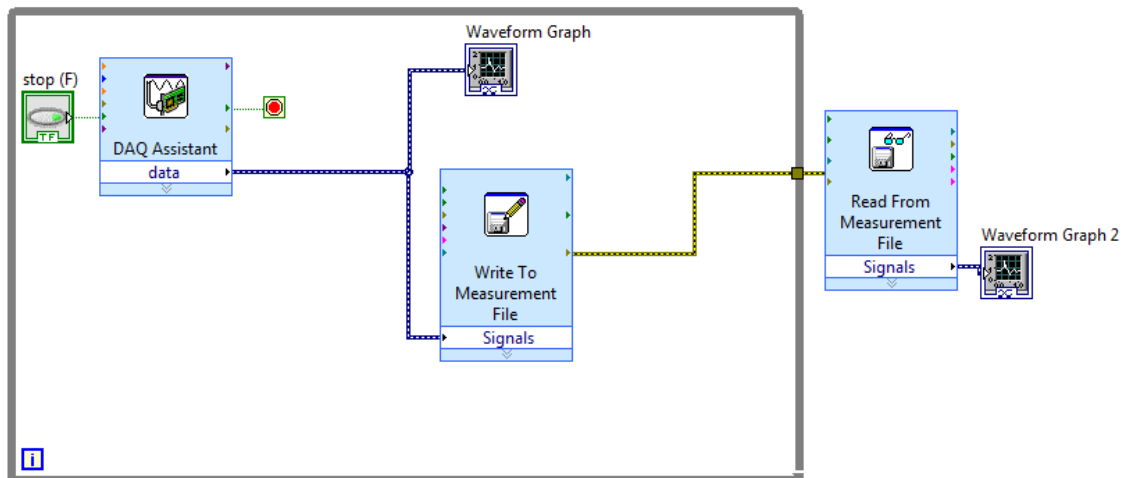


Figura No. 85 Rutina de programación para leer señales analógicas en LabVIEW 2013

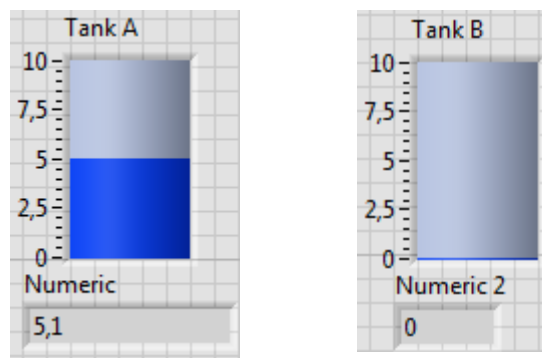
Para hacer correctamente la lectura de la señal se recomienda:

- Rango de valores de entrada de -10V a +10V DC.
- Empleo de entradas analógicas referenciadas a tierra.
- En el software se requiere de la rutina de programación *loop* y un switch de control para que su proceso se realice continuamente.
- Es necesario emplear en el panel frontal de LabVIEW las herramientas indicadoras o por lo menos una de visualización del comportamiento de la señal

### 5.2.2.1. Controles numéricos de las variables fundamentales en el panel frontal de LabVIEW.

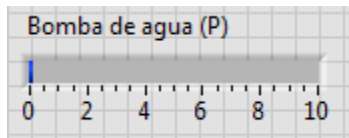
Como ya es sabido, son 5 las señales a instrumentar: 3 provenientes de los sensores de presión (analógicas) y 2 de los sensores digitales de temperatura y caudal. A cada una se le acondicionó el rango de valores de acuerdo a la etapa de amplificación de 0V a 10V. Cada uno. Las herramientas visuales permiten al usuario ver el valor el cual está monitoreando el sistema de adquisición de datos. A continuación se muestran tales elementos.

- Visualización de la señal acondicionada y procesada de los tanques A y B, facilitan al usuario apreciar en qué nivel de voltaje se encuentra tales componentes.



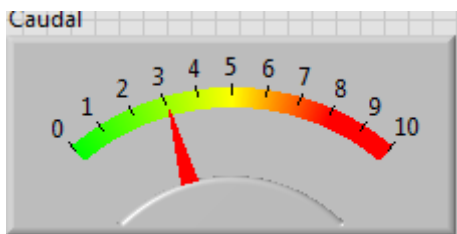
*Figura No. 86 Herramientas de visualización de los tanques A y B*

- Indicador de presión (P) que proporciona la bomba sumergible de agua, como los demás sensores, también emplea un rango de 0V a 10V pero se diferencia en la manera en cómo se visualizan los niveles de voltaje ya que se está tomando únicamente la medida de presión de la bomba, el más indicado para emplear en el panel frontal del software es el *slide* horizontal.



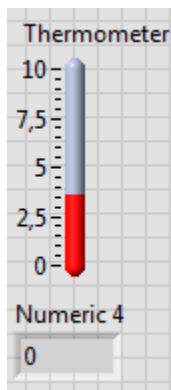
*Figura No. 87 Slide de visualización para la señal de presión por parte de la bomba*

- Para la señal correspondiente al caudal, se emplea un medidor o indicador el cual muestre el valor de la señal acondicionada en voltaje.



*Figura No. 88 Indicador de la señal acondicionada proveniente del sensor de caudal*

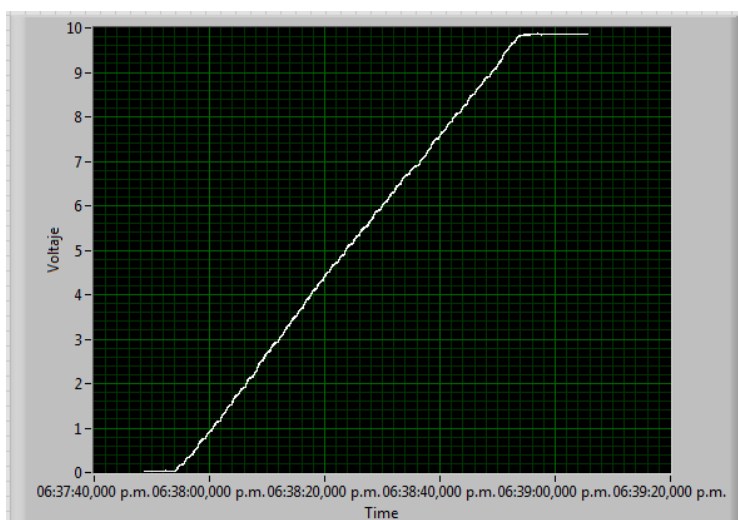
- Respecto a la visualización de la señal acondicionada de temperatura, el software ofrece la siguiente herramienta de visualización, cabe aclarar que dependerá de la temperatura del reservorio principal.



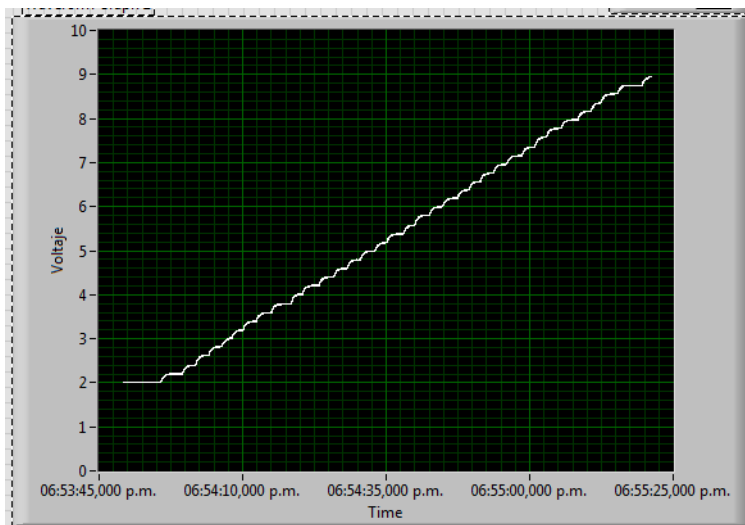
*Figura No. 89 Visualizador de la señal acondicionada de temperatura*

### 5.2.2.2. Visualización de las señales de los tanque A y B

La visualización de la señal es importante emplearla para comprobar su comportamiento y posibilita determinar si se presentan ruidos o fluctuaciones en el mismo. En este caso por practicidad y facilidad se representó el acondicionamiento de las señales por parte de los sensores de presión MPX5010GP, se evidenció que efectivamente su respuesta es lineal, es de aclarar que la velocidad en obtención de muestras y su resolución está estrechamente ligada a los componentes empleados para la conversión digital analógica.

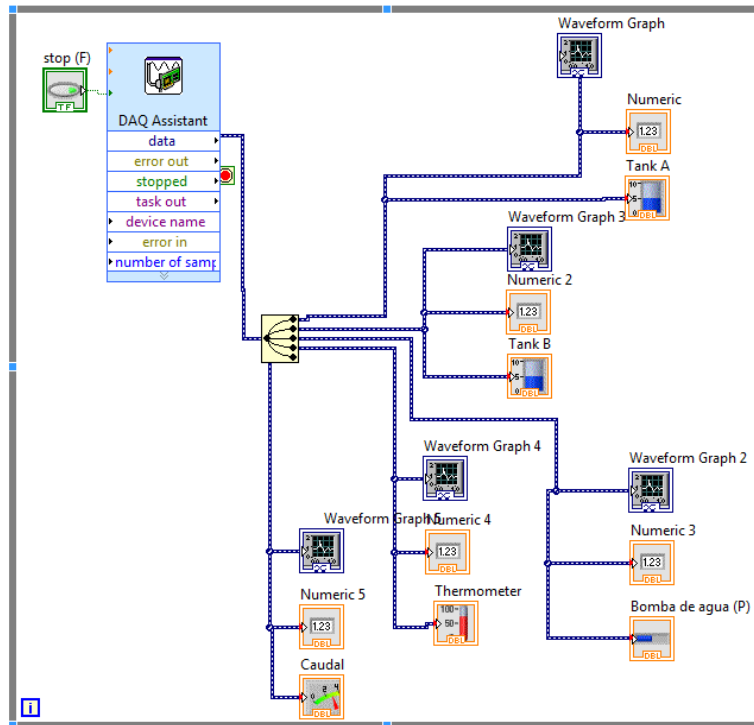


*Figura No. 90 Captura de la señal acondicionada del tanque A*



*Figura No. 91 Captura de la señal acondicionada del tanque B*

Para finalizar, se muestra la rutina de programación completa para la lectura de todos los sensores que hay en el sistema hidráulico, con esto el usuario podrá visualizar el comportamiento de las señales presentes del sistema y se le facilitará emplear una estrategia de control la cual se acomode a sus necesidades.



*Figura No. 92 Rutina de programación para la lectura de los sensores presentes en el sistema hidráulico*

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PROYECCIÓN

### 6.1 CONCLUSIONES

Del proceso de construcción del prototipo de una planta para el control de procesos industriales y el desarrollo de los objetivos del presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Respecto al cumplimiento del objetivo número 1:
  - Movilidad. La estructura fue realizada con software especializado de diseño industrial, teniendo presente la condición de que el prototipo pueda ser desplazado

para trabajar en diferentes entornos y/o aulas de clase. Posee manijas que facilitan el transporte sin dificultad. El haber sido realizado en software, permite realizar modificaciones en tiempo real y facilita su construcción, ya que ofrece una perspectiva tridimensional.

- **Peso.** El material usado para la estructura, permite que el sistema no sea tan pesado (aproximadamente 2 kilos sin agua). El peso total es de 10 kilogramos, que podría considerarse moderado y de fácil transporte. El trabajo debe ser realizado por dos personas como mínimo.
- **Durabilidad.** El estructura está hecha de acero cold rolled de ½” cuadrado. Es robusta, ligera y no es dúctil. Esta bañada en pintura electrostática que impide la oxidación por contacto con el agua.
- **Dimensiones.** Sus medidas son: 38.00 x 81.00 x 38.00 cm. Cada elemento encuentra su correspondencia sin afectar el sitio de trabajo de los demás.
- **Seguridad industrial.** Se usaron canaletas para proteger el sistema eléctrico ante un posible contacto con el agua por motivo de fugas o eventos fortuitos. Cada elemento se ubicó para evitar su afectación frente algún imprevisto.
- **Instrumentación de las variables fundamentales.** Para medir el nivel, se procedió a realizarlo por medio de los sensores de presión en la parte inferior de cada tanque. El caudal es medido por medio de un sensor de efecto Hall, enviando un tren de pulsos que varía en frecuencia dependiendo del caudal que circula. La presión para la salida de la bomba, fue posible medirla usando un sensor que se ajustara a la presión máxima de salida de la bomba. La temperatura fue sensada un dispositivo capaz de convertir la variaciones térmicas en pulsos eléctricos.



El desarrollo del objetivo número 1 se realizó exitosamente y en el literal concerniente a proyecciones, se hacen las respectivas recomendaciones para realizar un segundo modelo más sofisticado.

- Respecto al cumplimiento del objetivo número 2:
  - Válvulas con respuesta lineal. En el mercado la adquisición de un elemento que cumpla con la presente exigencia es difícil por motivos de presupuesto, se hizo necesario escoger una válvula que tendiera a dar una respuesta lineal teniendo en cuenta la diferencia de presión (presión de entrada y salida en la válvula), caudal, diámetro, grado de abertura del vástago y el tipo de obturador. Teniendo presente lo anterior, se realiza un proceso de Linealización. En el mercado es muy complicado encontrar este tipo de válvulas.
  - Tanques. No pueden ser de vidrio, pues serían propensos a romperse, así que se escogieron de material plástico y de volumen cilíndrico.
  - Sensores. La precisión y/o exactitud son variables directamente proporcionales a la cantidad de dinero disponible, y en el presente caso, se eligieron los sensores que se ajustaban al presupuesto, sin embargo esto no quiere decir que no trabajen bien. Para los sensores de presión y temperatura, se requiere realizar pequeños ajustes para obtener datos fiables, para el caso del sensor de caudal (error del 10%) es menester calibrarlo antes de realizar la práctica. En general cada sensor trabaja muy bien, los sensores de presión son muy susceptibles a cambios en el

suministro de voltaje, por lo que se debe tener mucho cuidado pues se averían con facilidad. Es aconsejable usar reguladores de voltaje para cada sensor.

- Electrobomba. Las bombas periféricas son muy costosas y pesadas, además ofrecen presiones muy altas y en para el presente proyecto no es necesario “levantar” tanta agua. Una bomba sumergible puede trabajar perfectamente y son asequibles.

La selección de componentes cumplió con los requerimientos de diseño para el ensamblaje de la planta: haciendo énfasis en la linealidad de los componentes (válvulas reguladoras). Accesorios como tuberías, acoples y mangueras cumplieron con todos sus propósitos, su adecuada instalación permite que se eviten futuras fugas y deterioro por su uso. Además cada elemento es de fácil adquisición. El objetivo número 2 fue cumplido satisfactoriamente.

- Respecto al cumplimiento del objetivo número 3:
  - Se cumplió óptimamente el objetivo referente al funcionamiento de la planta con ayuda del software de instrumentación virtual LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos, para posteriormente relacionar su funcionalidad por medio de una guía de laboratorio en la cual posibilita al usuario trabajar con los componentes de la planta y así obtener provecho del sistema hidráulico.

La fase de pruebas y experimentación con la versión estudiantil del software LabVIEW demostró que se pueden instrumentar las variables fundamentales que hay en la planta, y con ayuda del mismo, los actuadores respondieron a los requerimientos planteados.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Del proceso de construcción se obtuvieron un sinnúmero de apreciaciones y resultados valiosos para quien decida desarrollar o trabajar con este tipo de sistemas:

- La precisión en el proceso de toma de muestras depende mucho de los componentes electrónicos empleados, se recomienda trabajar con tolerancias por debajo del 5%, debido a que los modelos ideales que exige el sistema, como su nombre lo dice, son ideales, esto hace que se busquen elementos que intenten llegar a dichos modelos.
- Los materiales de la estructura influyen en la durabilidad del sistema, se recomienda emplear componentes resistentes tanto a la humedad como al agua.
- En este tipo de proyectos la precisión y resolución en los sensores y dispositivos electrónicos deben ser tenidos en cuenta.
- La planta prototipo requiere de un mantenimiento continuo, logrando que se proporcione un mayor rendimiento y durabilidad. De esta manera se recomienda revisar periódicamente la circuitería, conexiones entre mangueras y realizar habitualmente cambios del líquido.
- Es recomendable emplear conversores digitales-analógicos con mayor resolución para obtener medidas más estables y fiables (en este caso se recomienda emplear resoluciones entre los rangos de 10 a 12 bits).

### 6.3 PROYECCIÓN

Quien desee trabajar en este proyecto, tiene la posibilidad de retomarlo para trabajos futuros, lo cual posibilita que se le realicen mejoras o cambios en su estructura, tanto para adicionar sensores y actuadores dependiendo del nivel de complejidad al que se quiere llegar y así proporcionar un mayor rendimiento. Este prototipo proporciona un modelo matemático de segundo orden, quien desee aumentar el orden del sistema, es imprescindible que adicione más tanques. Por ejemplo si se desea un sistema de tercer orden, tendrán que haber 3 tanques. También posibilita medir la temperatura en cada uno de los tanques (según conveniencia del usuario) quien desee mayor eficiencia en el trabajo de este prototipo se requiere adquirir sensores más sofisticados. Además se le permite al usuario emplear varios métodos de control (por medio de señales de voltaje), y que a su vez sus actuadores respondan con el ingreso de una señal de voltaje.

Una de las proyecciones propuestas para trabajar en la planta, es el de aprovechar la circuitería existente (microcontroladores) para agregar una etapa de comunicación serial, lo cual posibilite al usuario por medio de ésta, realizar tanto la lectura como escritura de los microcontroladores de la planta, y que junto con el software LabVIEW, se logre visualizar en tiempo real las medidas de cada uno de las variables por cada uno de los sensores, la finalidad es que se obtenga mayor provecho a todas las funcionalidades que proporciona la electrónica de la planta y el software.

## REFERENCIAS

- Ø María Rosa Espot. (2006). LA AUTORIDAD DEL PROFESOR, que es la autoridad y cómo se adquiere. Madrid: MONOGRAFÍAS ESCUELA ESPAÑOLA.
- Ø Departamento de tecnología. Licenciatura en Electrónica. (2013). Documento del área de Sistemas de Control. 2013, de UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA. Recuperado de: [http://www.hudamasa.com/PCLE/Materias/Programa/doc\\_area/control.pdf](http://www.hudamasa.com/PCLE/Materias/Programa/doc_area/control.pdf)
- Ø Antonio Creus Solé. (2010). INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL. México D.F.: Alfaomega.
- Ø José Acedo Sánchez. (2006). INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS. España: Díaz de Santos.
- Ø María, Moreira, B., M, Jovel, O., R, Jiménez, C., & V, Moncada, B. (2009). Diseño e implementación de medios de laboratorio para contribuir al proceso de enseñanza aprendizaje en el área de Instrumentación Industrial. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua Nicaragua. Nexo, 21, 8. 15 de Octubre de 2015, De Dialnet Base de datos.
- Ø Ramírez, L., & Londoño, M. (2007). Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal del agua. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín Colombia.
- Ø Cristancho, Jean, R. (2009). Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando MATLAB para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura de control. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá Colombia.

- Ø Alí, Carrillo., & Moy, Hau. (2009). Modelo didáctico para el aprendizaje significativo en los sistemas automáticos de control. Universidad Rafael Beloso Chacín, Maracaibo Venezuela.
- Ø Gil, Óscar, F., & Robayo, David. (2011). Diseño, construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia.
- Ø Paez, Óscar, R. (s.f). Norma ISA. Universidad de Santiago de Chile, Santiago Chile.
- Ø NAVARRETE, N. (2003). Atlas básico de tecnología. Barcelona: Parramón.
- Lajara, J., & Pelegry, J. (2011). LabVIEW: Entorno gráfico de programación. Barcelona: MARCOMBO.
- Ø OGATA, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson.
- Ø Escolano, F., Cazorla, M., Alfonso, M., Colomina, O., Lozano, M.. (2003). Inteligencia Artificial Modelos, Técnicas y Áreas de Aplicación. . Madrid: THOMSON.
- Ø A. Canut, F. J. Guerra, B. Guzmán, A. Struck. (2008). Número de Reynolds. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México.
- Ø Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2017). *Pressure*. [online] Available at: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html> [Accessed 9 Jun. 2017].
- Ø Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2017). *Presión en fluido estático*. [online] Available at: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pflu.html> [Accessed 29 Jun. 2017].
- Ø Definista (2017). ¿Qué es Ley de Vasos Comunicantes? - Su Definición, Concepto y Significado. [online] Conceptodefinicion.de. Available at: <http://conceptodefinicion.de/ley-de-vasos-comunicantes/> [Accessed 13 Jun. 2017].
- Ø <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>

Ø Instrumentación básica de procesos industriales. (2007). [ebook] M. en C. Armando Morales Sánchez, p.722. Available at: <https://es.scribd.com/doc/6851050/Curso-ISA-Presentation-Instrumentacion-Basica> [Accessed 29 Jun. 2017].

Ø Mavainsa.com (2017). *Control de procesos*. [ebook] Mavainsa, S.L, p.1. Available at: [http://www.mavainsa.com/documentos/9\\_control\\_procesos.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/9_control_procesos.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø ocwus.us.es (2017). *Régimen laminar y turbulento*. [online]. Available at: [http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%201.Principios%20de%20Hidraulica/tutorial\\_05.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%201.Principios%20de%20Hidraulica/tutorial_05.htm) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø fluidos.eia.edu.co (2017). *Clasificación del flujo como laminar o turbulento*. [online]. Available at: [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar\\_turbulento.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm) [Accessed 20 Jul. 2017].

Ø chips.mecatronium.com (2017). *Tutorial Sensor De Flujo Yf-S201*. [online]. Available at: <http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/> [Accessed 20 Jul. 2017].

Ø savinobarbera.com (2017). *Teoría de las bombas (bomba) centrífuga*. [online]. Available at: <http://www.savinobarbera.com/espanol/teoria.html> [Accessed 19 Jul 2017].

Ø Mavainsa.com (2017). *Bombas*. [ebook] Mavainsa, S.L, p.6. Available at: [http://www.mavainsa.com/documentos/6\\_bombas.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/6_bombas.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø Atmel.com (2017). *Overview ATmega328P (Block Diagram)*. [datasheet] Atmel, p.6. Available at: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf) [Accessed 19 Jul. 2017].

Ø electgpl.com (2017). *El ATmega328p* [online]. Available at: <https://electgpl.blogspot.com.co/2016/06/el-atmega328p.html> [Accessed 24 Jul. 2017].

Ø Aristizábal, D., Ramírez, C. and Retrepo, R. (2010). *Taller Experimental Linealización*.

[ebook] Medellín: Universidad Nacional de Colombia, p.9. Available at:

<https://aarrietaj.files.wordpress.com/2012/02/linealizacion.pdf> [Accessed 3 Apr. 2017].

Ø Pumpfundamentals.com. (2017). *Formulas (Imperial units)*. [online] Available at:

<http://www.pumpfundamentals.com/formula%20grab-bag.htm> [Accessed 1 Aug. 2017].



**ANEXOS**

## **ANEXO A: GUÍA DE LABORATORIO**

### **PLANTA PARA EL CONTROL DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES**

Uno de los objetivos de la construcción de la planta es que ésta debe ser aplicada a una prueba de laboratorio, la cual deberá tener en cuenta los sensores involucrados en la planta junto con sus actuadores (bomba sumergible y válvulas motorizadas), por eso es necesario planear una guía de laboratorio la cual está dividida en dos prácticas: en primera instancia se desarrolló la práctica 1 denominada “Identificación y clasificación de instrumentos (norma isa-S5.1)” y en segunda instancia “Control de nivel en los tanques A y B con software de instrumentación virtual (LabVIEW). Con estas prácticas se busca obtener provecho de todas las características y funcionalidades de la planta, de tal manera que se le facilite al usuario emplearle cualquier estrategia de control.

#### **Descripción de la planta**

La planta que instrumenta las variables fundamentales (nivel, caudal, presión y temperatura) es un sistema conformado por un circuito hidráulico (válvulas, tanques y mangueras) e instrumentos como lo son sensores y sus respectivos actuadores, de esta manera la planta posibilita al usuario lograr un control automático dependiendo de las necesidades que éste desee.

El sistema tiene mangueras de ½ pulgada y sus respectivos accesorios (acoples, nipples y codos), también está conformado por dos tanques de plástico (tanques A y B) para el almacenamiento de agua, cada uno con capacidad de 2 litros, y un tercer tanque (reservorio) donde se alojarán tanto la bomba sumergible junto con el líquido que empleará el sistema hidráulico, también consta de tres válvulas motorizadas programadas para que funcionen linealmente, y una válvula de bola

con accionamiento manual, por parte de la instrumentación el sistema cuenta con 5 sensores clasificados en sensores analógicos y digitales: 3 sensores analógicos de presión donde 2 de ellos son para medir tanto el nivel como la presión de los tanques A y B y un tercer sensor que mide la presión a la salida de la bomba sumergible, y por último, dos sensores digitales encargados cada uno de medir tanto el caudal que se le ingresa al tanque A y la temperatura en el tanque reservorio.

A groso modo la planta trabaja haciéndole circular agua desde el reservorio por medio de la válvula motorizada 1 y comenzando llenar los tanques A y B, de tal manera que con la ayuda de la aceleración de la gravedad el líquido regrese al tanque reservorio. Es de aclarar que con ayuda de las válvulas motorizadas 2 y 3, es posible que el líquido transite por uno o más tanques (también

Teniendo en cuenta la válvula manual esté abierta o cerrada). La planta le ofrece al usuario un panel con 8 tomas de voltaje (5 salidas con un rango de 0 a 10 Volts para los sensores que se presentan en el sistema y 3 entradas con rango de 0 a 5 Volts para el control de las válvulas motorizadas), esto hace que se configure un control de procesos de nivel de primero o segundo orden, según el número de tanques que intervengan en el proceso.

## **PRÁCTICA 1. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS (NORMA ISA-SS5.1)**

### **1. RESUMEN**

La práctica número 1 contribuye al estudiante en la identificación y clasificación de instrumentos con el estándar ISA-S5.1, logrando que el proceso de enseñanza sobre la diagramación y terminología sobre la instrumentación industrial se consolide, facilitándole que conciba y aplique el proceso de tipificación y diagramación de dichos estándares en el campo de la instrumentación industrial y control de procesos.

### **2. INTRODUCCIÓN**

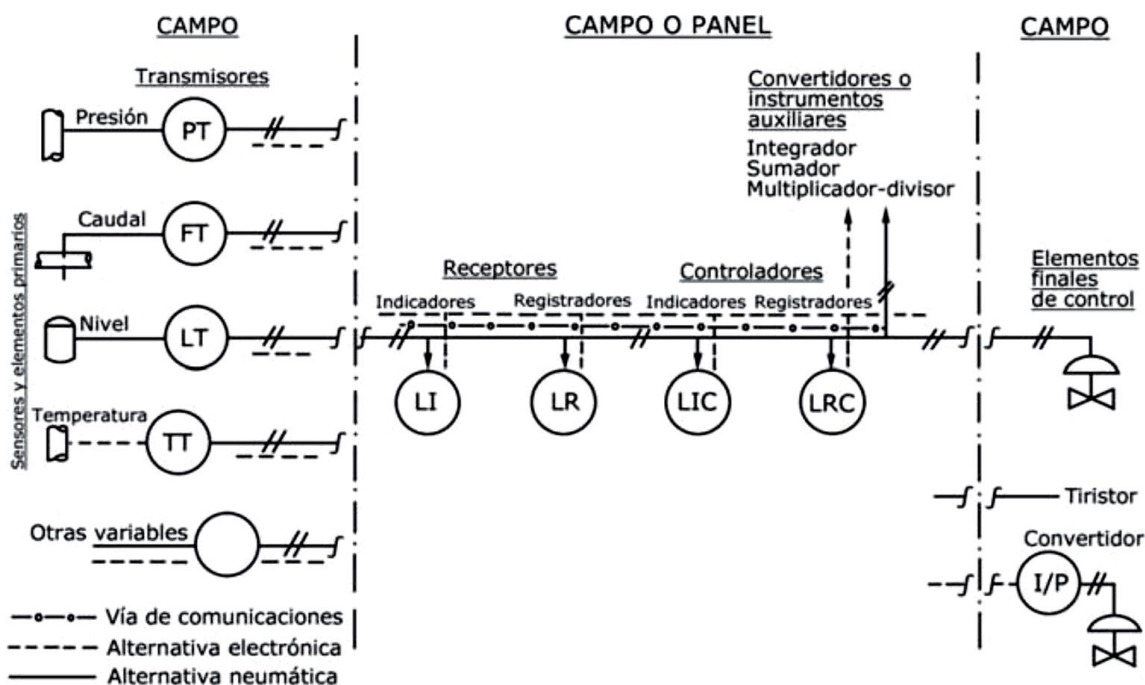
En el campo de la instrumentación y control industrial existen normatividades para la representación y clasificación tanto de instrumentos, actuadores y elementos de control. Su importancia radica en estructurar un orden o jerarquía determinado, de tal manera que su representación esté presente en el campo de las organizaciones industriales. Para consolidar un sistema de denominación el cual posea designaciones como convenciones, códigos y simbología, existen dos reconocidas sociedades: la ISA (*Instrument Society of América*) originaria de EEUU y la DIN (*Deutsches Institut für Normung*) proveniente de Alemania, las cuales están encaminadas a trabajar en la clasificación, normalización y designación de instrumentos a nivel industrial y científico.

#### **2.1 Normatividad ISA**

Las normas ISA (Instrument Society of America) son empleadas mayoritariamente en la industria para la clasificación de instrumentos, tal y como se puede representar en la figura, esta norma se

encarga de designar un código alfanumérico con el fin de identificar un instrumento que compone el sistema de clasificaciones de la aplicación industrial.

Las normas establecen que en ámbitos generales los instrumentos deben estar identificados con letras, de tal manera que los clasifique de manera funcional. Además, es de tener en cuenta que dichas letras deben cumplir con ciertos parámetros (sufijos, orden, mayúsculas, etc.) con el objetivo de conservar una orden y/o jerarquía.



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 General

Identificar la normatividad ISA-S5.1 en un diagrama junto con sus componentes para aplicarlas y proporcionar utilidad en el campo de la instrumentación industrial.

#### 3.2 Específicos

- Distinguir los instrumentos, conexiones y accesorios de acuerdo a sus características y funcionalidad

- Conocer los parámetros a la hora de diseñar un diagrama con normatividad ISA S5.1
- Definir el diagrama de un sistema hidráulico que se ajuste las propiedades y recomendaciones que exige la normatividad ISA S5.1

#### **4. COMPETENCIAS**

- Identifica la instrumentación de la planta, su funcionalidad, y los clasifica de acuerdo a la normatividad en el ámbito de la instrumentación industrial.
- Emplea la numeración e identificadores de la norma ISA S5.1 para elaborar un diagrama de acuerdo a las funciones específicas de los componentes del sistema.
- Diseña un diagrama de forma clara, organizada y secuenciada para distinguirlo con un modelo de instrumentación.

#### **5. HERRAMIENTAS NECESARIAS**

- Sistema hidráulico preparado con sensores y actuadores (Planta )
- Folio para el dibujo de los diagramas

#### **6. METODOLOGÍA**

Para desarrollar la práctica identifique cada uno de los elementos que componen la planta. Diseñe y componga un diagrama de la planta en donde se muestren sus dispositivos junto con el cableado de las señales de control. Identifique en el diagrama los puntos de conexión de toda la tubería. Utilice la normatividad ISA S5.1 para dibujar el esquema. Tenga en cuenta la información que se presenta a continuación con respecto a los parámetros de diseño y recomendaciones para identificar y dibujar esquemas.

## 6.1 Generalidades y pautas sobre la normatividad

Cuando a un sistema industrial se le desea asignar la norma ISA, es necesario tener en cuenta la tabla que se muestra a continuación junto con las siguientes recomendaciones:

- El instrumento que componga el sistema debe ser descrito con un código alfanumérico que incluya un identificador numérico de lazo.
- La cantidad de letras que debe contener el identificador del instrumento no debe ser más de cuatro.
- Al numerar los bucles, estos pueden ser de manera paralela (iniciando una secuencia numérica para cada nueva letra) y en serie cuando determina los bucles de instrumentos de un proyecto y debe ir consecutivo al orden numérico establecido.
- Se añade un sufijo si el bucle contiene distintos instrumentos con la misma identificación funcional.
- Se debe distinguir por todas sus funciones a los instrumentos que tengan más de dos funciones.
- Cuando el instrumento contiene accesorios y no tienen su representación de manera explícita, se hace necesario designarle una identificación de acuerdo a la utilidad y hacer la relación con su número de bucle.






| PRIMERA LETRA(4) |                                  |                           | LETRAS SUCESIVAS(3)                 |   |                         |
|------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|
|                  | Variable medida o inicial        | Letra de modificación     | Lectura o función de lectura pasiva | Función de salida   | Letra de modificación   |
| <b>A</b>         | Análisis(5,19)                   |                           | Alarma                              |   |                         |
| <b>B</b>         | Quemador, combustión             |                           | Libre(1)                            | Libre(1)  | Libre(1)                |
| <b>C</b>         | Libre(1)                         |                           |                                     | Control(13)   |                         |
| <b>D</b>         | Libre(1)                         | Diferencial(4)            |                                     |   |                         |
| <b>E</b>         | Tensión(f.e.m.)                  |                           | Sensor (Elemento primario)          |   |                         |
| <b>F</b>         | Caudal                           | Relación(4)               |                                     |   |                         |
| <b>G</b>         | Libre(1)                         |                           | Vidrio, Dispositivo visión(9)       |   |                         |
| <b>H</b>         | Manual                           |                           |                                     |   | Alto(7,15,16)           |
| <b>I</b>         | Corriente(eléctrica)             |                           | Indicar(10)                         |   |                         |
| <b>J</b>         | Potencia                         | Exploración(7)            |                                     |   |                         |
| <b>K</b>         | Tiempo, programación tiempo      | Variación de tiempo(4,21) |                                     | Estación de control(22)                                   |                         |
| <b>L</b>         | Nivel                            |                           | Luz(11)                             |   | Bajo(7,15,16)           |
| <b>M</b>         | Libre(1)                         | Momentáneo(4)             |                                     |   | Medio, Intermedio(7,15) |
| <b>N</b>         | Libre(1)                         |                           | Libre(1)                            | Libre(1)  | Libre(1)                |
| <b>O</b>         | Libre(1)                         |                           | Orificio, Restricción               |   |                         |
| <b>P</b>         | Presión, Vacío                   |                           | Punto(Ensayo)Conexión               |   |                         |
| <b>Q</b>         | Cantidad                         | Integrar, Totalizar(4)    |                                     |   |                         |
| <b>R</b>         | Radiación                        |                           | Registro(17)                        |   |                         |
| <b>S</b>         | Velocidad, Frecuencia            | Seguridad(8)              |                                     | Interruptor(13)   |                         |
| <b>T</b>         | Temperatura                      |                           |                                     | Transmisión(18)   |                         |
| <b>U</b>         | Multivariable (6)                |                           | Multifunción(12)                    | Multifunción(12)  | Multifunción(12)        |
| <b>V</b>         | Vibración, Análisis mecánico(19) |                           |                                     | Válvula, Regulador tiro, Persiana(13)                     |                         |
| <b>W</b>         | Peso, fuerza                     |                           | Vaina, Sonda                        |   |                         |
| <b>X</b>         | Sin clasificar(2)                | EjeX                      | Sin clasificar(2)                   | Sin clasificar(2)   | Sin clasificar(2)       |
| <b>Y</b>         | Evento, Estado o Presencia(20)   | EjeY                      |                                     | Relé, Cálculo, Conversión(13,14,18)                       |                         |
| <b>Z</b>         | Posición, Dimensión              | EjeZ                      |                                     | Motor, Actuador, Elemento final de control sin clasificar |                         |



## 6.2 Representación

La norma ISA emplea distintas simbologías para representar todos los elementos que componen un sistema (en este caso un sistema hidráulico). Cada elemento se representa de acuerdo a su función y las características que lo componen.


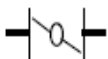

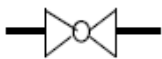


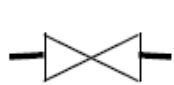

- Representación de líneas: Simboliza las conexiones que hay en un sistema

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
|  | <b>Tubería de proceso (línea de proceso)</b> |  | <b>Señal hidráulica</b>  |
|  | <b>Señal neumática</b>                       |  | <b>Señal acústica o electromagnética<br/>(calor, radio, ondas o luz)</b> |
|  | <b>Señal eléctrica</b>                       |  |  |

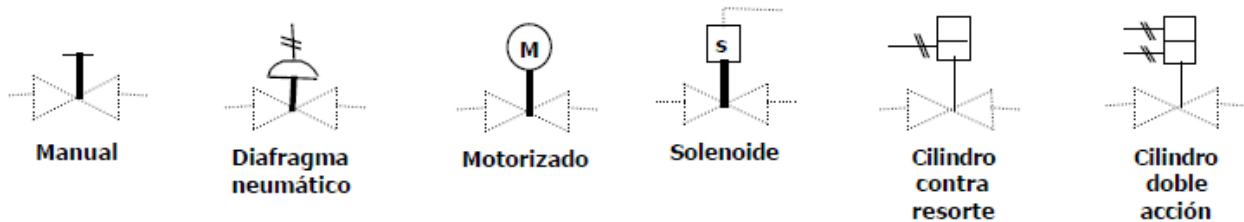
- Representación de instrumentos: Representa los instrumentos ya sean sensores o transmisores

|   |   |   |     |
|---|---|---|-----|
|  |  |  | • R |
| <b>Instrumento descrito por hardware</b>  | <b>Función realizada por software en dispositivo inteligente</b>                    | <b>Lógica de trabajo relativa al instrumento</b>                                      |     |

Representación de válvulas: Cada válvula tiene una representación de acuerdo a sus propiedades y uso en el sistema.

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <b>Cuerpo general</b>   | <b>Válvula mariposa</b>   | <b>Válvula de bola</b>   | <b>Válvula de globo</b>   |
|  |  |  |  |
| <b>Válvula normal abierta (ISA)</b>   | <b>Válvula normal cerrada (ISA)</b>   | <b>Válvula normal abierta (común)</b>  | <b>Válvula normal cerrada (común)</b>   |

- Representación de actuadores: En sistemas hidráulicos representa las válvulas que tienen algún tipo de actuador



## 7. INFORME

Realice un informe el cual se evidencie el proceso y conclusiones que dejó el desarrollo de la práctica. En el informe se debe detallar el proceso de identificación de los componentes, descripción con diagramas de los componentes del sistema, resultados y apreciaciones de la práctica con conclusiones del desarrollo del diagrama esquemático de la planta.

## 8. REFERENCIAS

- Antonio Creus Solé. (2010). Instrumentación industrial. México D.F.: Alfaomega.
- Bastidas, Christian, A., & Medina, William, E. (2017). Construcción del prototipo de una planta para el control de procesos industriales, como apoyo en las prácticas del área de control de la licenciatura en electrónica. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá Colombia.

## **PRÁCTICA 2. CONTROL DE NIVEL EN LOS TANQUES A Y B CON SOFTWARE DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL (LabVIEW)**

### **1. RESUMEN**

La práctica número 1 aporta al estudiante en el reconocimiento y posterior uso del software de instrumentación virtual LabVIEW, de tal manera que su proceso de aprendizaje sobre la lectura de señales de la planta en el software y posterior control de nivel se refuerce y logre aplicarse en otras problemáticas tanto en el campo de la instrumentación como en la del control.

### **2. INTRODUCCIÓN**

A la hora de trabajar con este tipo de plantas de control es menester dominar temas como los que se mencionan a continuación.

#### 2.1 Sistemas de control

Un sistema de control es un esquema de organización, métodos, procedimientos y resultados, integrado de confiables mecanismos de verificación o evaluación, con el fin de procurar una adecuada gestión, de todas las actividades y operaciones. Está integrado de subsistemas (eléctrico, mecánico, neumático) encargados de actuar sobre el sistema.

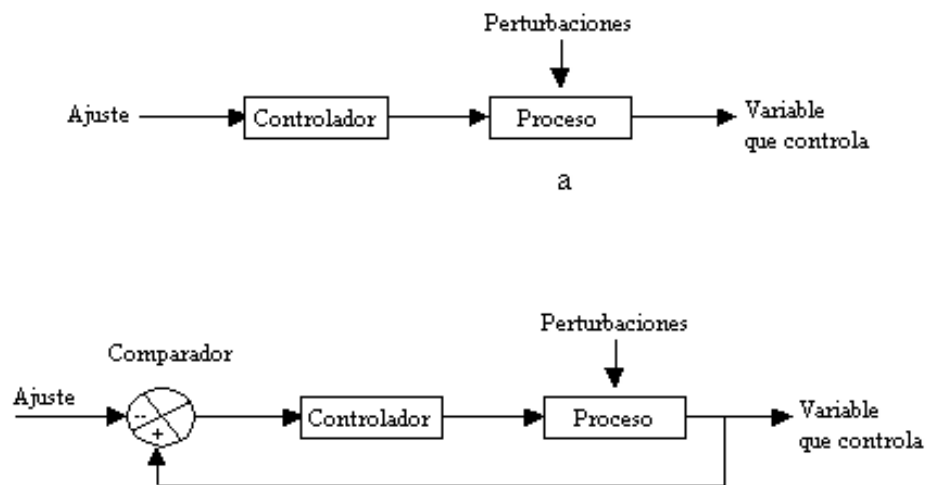
En los sistemas de control se pueden evidenciar ciertos conceptos clave, los cuales son importantes tenerlos en cuenta a la hora de efectuar un control automático.

- Referencia (efecto deseado o *set point*)
- Error

- Actuador
- Planta o proceso
- Sensor o captador

### 2.1.1 Sistemas de control en lazo abierto y cerrado:

A groso modo un sistema está basado en una entrada, proceso y salida o resultado del proceso, y en este caso se divide de acuerdo su estructura, de esta manera es útil saber en qué consiste un lazo abierto y lazo cerrado a la hora de diseñar un sistema de control. Un sistema en lazo abierto se caracteriza en que su señal de salida no es realimentada lo cual hace que no tenga efecto en la acción de control y no se contrasta tal salida con el valor de referencia, mientras que el sistema en lazo cerrado si, lo cual hace que la señal de salida surta efecto sobre la variable de control.



## 2.2 LabVIEW 2013 y la tarjeta de adquisición de datos NI-6008

Para la adquisición y procesamiento de señales es necesario emplear la tarjeta de adquisición de datos NI-6008 y el software LabVIEW. Este software es una poderosa plataforma de desarrollo de proyectos y diseño de sistemas con una interfaz de programación gráfica, el software se emplea generalmente para trabajar con sistemas de control industrial, tanto en hardware como en software, y en el ámbito de la instrumentación industrial con adquisición de datos.

Propiedades del software:

- Trabaja con múltiples interfaces de comunicación: Serial, paralelo, TCP/IP, Bluetooth, USB, entre otros.
- Ofrece la posibilidad de trabajar con otros lenguajes y entornos.
- Posibilita la conectividad con distintos módulos.
- Emplea diversas utilidades tanto gráficas como textuales para el procesamiento de señales.

### 2.2.1 Sistema de adquisición de datos NI-6008

Para la lectura y procesamiento de las señales es necesario emplear la tarjeta de adquisición de National Instruments NI-6008, debido a sus especificaciones, fácil operación y conectividad USB para sincronizarla a cualquier computadora con LabVIEW. Este dispositivo tiene como ventaja la posibilidad de emplearlo en distintos software de ingeniería, relacionados con los sistemas de adquisición y procesamiento de datos.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 General

Interactuar con el software de instrumentación virtual LabVIEW con el de fin analizar gráficamente el comportamiento de las señales que proporciona la planta y efectuar una estrategia de control de nivel más adecuada.

#### 3.2 Específicos

- Corroborar virtualmente con la tarjeta NI-6008 y LabVIEW el comportamiento de las señales analógicas de salida presentes en el sistema
- Calcular las variables de sintonización del controlador PID de los tanques A y B por medio del método Ziegler Nichols
- Programar en LabVIEW la rutina para el movimiento de los actuadores de la planta (válvulas motorizadas 2 y 3)

### 4 COMPETENCIAS

- Identifica la instrumentación de la planta, su funcionalidad, y secuencias de programación en el ámbito del control de procesos.
- Utiliza la herramienta de adquisición de señales tanto en hardware como en software, para la descripción de los resultados obtenidos a lo largo de la práctica.
- Propone estrategias de control para su sintonización, dependiendo de la problemática que surja y donde se requiera el uso de controladores PID.
- Configura y ejecuta los bloques de programación de forma secuenciada con el fin de minimizar los errores a la hora de implementar las rutinas de programación en LabVIEW.

## **5 HERRAMIENTAS NECESARIAS**

Para el óptimo desarrollo de la práctica se requieren las siguientes herramientas:

- Sistema hidráulico preparado con sensores y actuadores (Planta )
- Software de instrumentación virtual LabVIEW
- Tarjeta de adquisición NI-6008
- Herramientas de laboratorio (cableado, multímetro y toma eléctrica)

## **6 METODOLOGÍA**

A la hora de desarrollar la práctica tenga presente la siguiente información, la cual es útil para el buen funcionamiento de la planta y obtención de resultados.

### 6.1 Planta para a emplear en la práctica

Identificación de las partes que componen el sistema hidráulico:



- A. Válvula motorizada #1
- B. Sensor de caudal
- C. Sensor de presión MPX2050 (presión bomba)
- D. Tanques A y B
- E. Válvula motorizada #2
- F. Sensor de presión MPX5010 tanque A
- G. Válvula motorizada #3
- H. Válvula de accionamiento manual
- I. Reservorio
- J. Sensor de presión MPX5010 tanque B
- K. Panel de señales (voltajes)

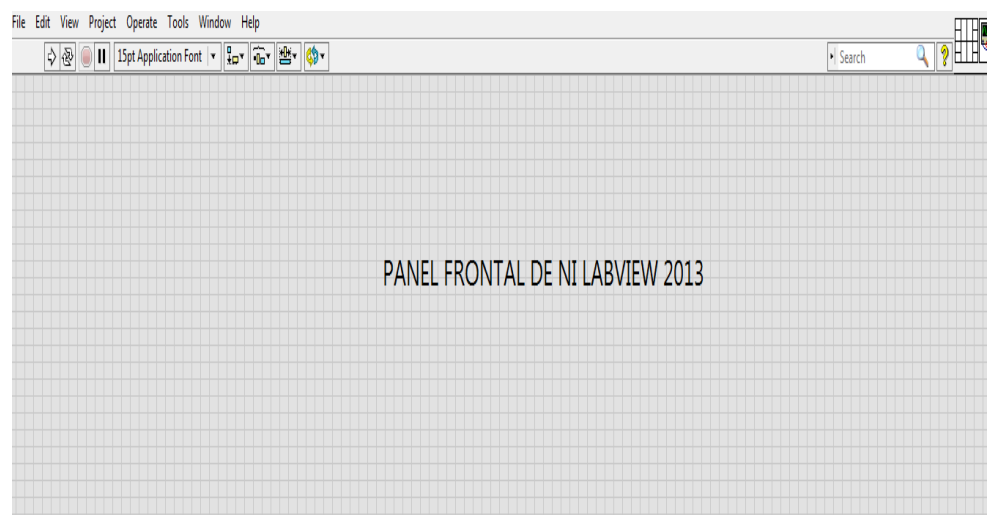


Panel de señales para la adquisición de las señales:

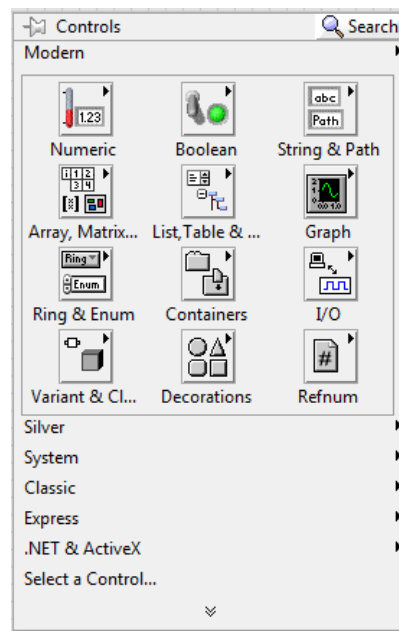


6.2 Descripción de las herramientas que ofrece el software LabVIEW para el desarrollo de la práctica.

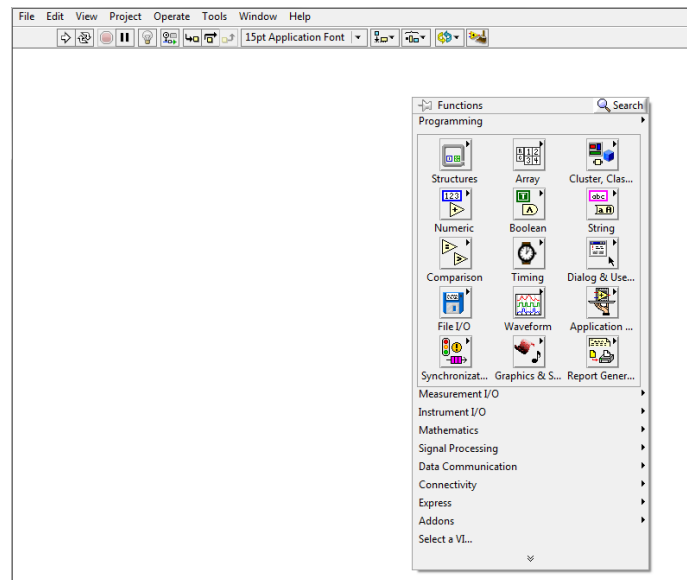
- Panel frontal: Aparece cuando se abre un nuevo proyecto de LabVIEW o uno existente. Este panel es la interfaz de usuario para el desarrollo del proyecto. Está compuesto por una barra de herramientas y el panel para plasmar las herramientas de control del programa.



- Paleta de controles: Como su nombre lo dice, se encarga de ofrecer al usuario los diversos controles e indicadores los cuales están segmentados de acuerdo a su función y propiedades, éstos deben ser introducidos en el panel frontal del software.

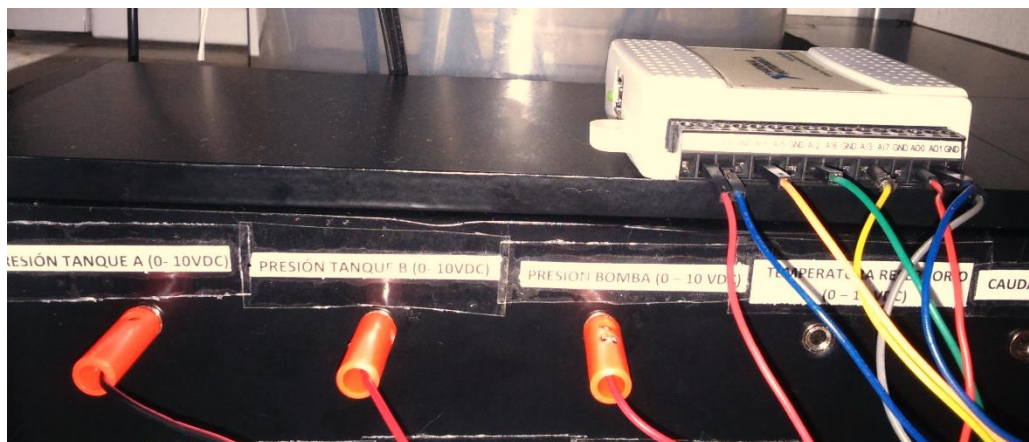


- Panel de programación y paleta de funciones: Allí se ubicarán todos los bloques y funciones que fundamentan el programa, el panel requiere del uso de la paleta de funciones, ya que su función consiste en proporcionar los elementos para la programación por bloques, se encuentran distintas herramientas esenciales para la programación y están clasificadas de acuerdo a sus propiedades y utilidad.

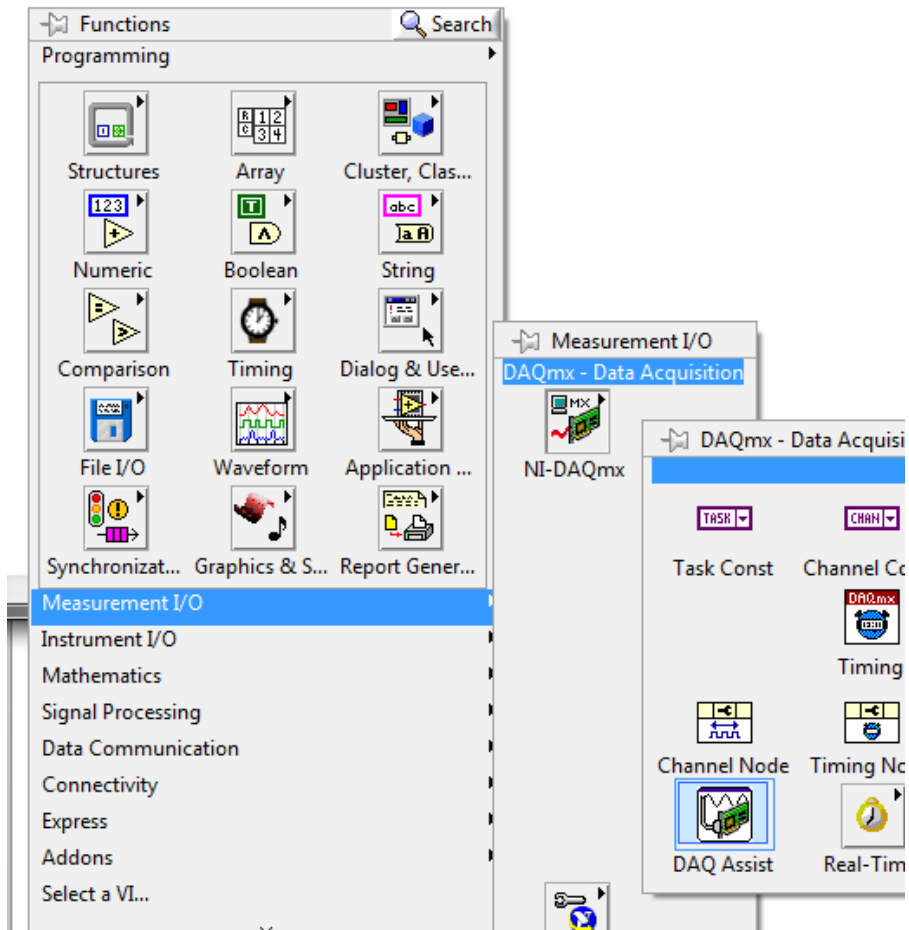


### 6.3 Proceso para la adquisición de las señales de la planta:

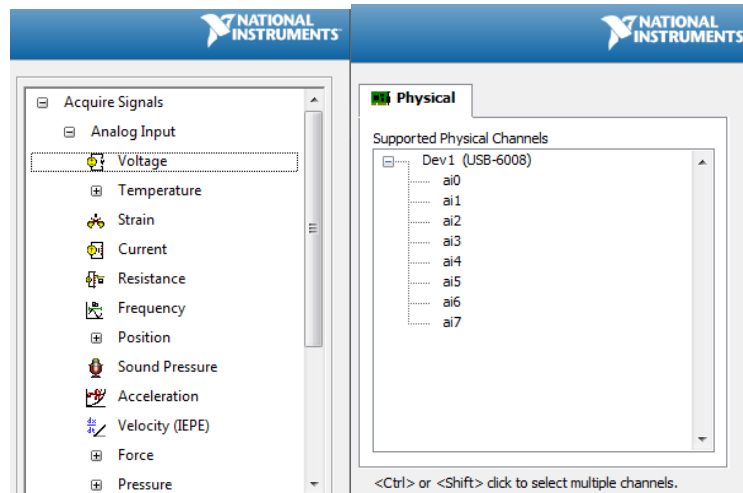
6.3.1 Por medio de cables conecte a cada uno de los canales analógicos de entrada de la tarjeta de adquisición, las señales de salida que proporciona la planta del sistema hidráulico (tenga en cuenta el orden en que conecta las señales y el número del canal impreso en la tarjeta).



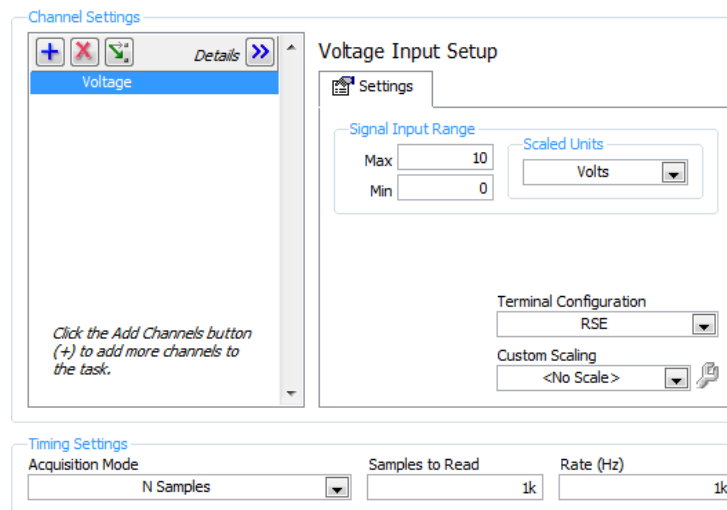
6.3.2 En el panel de programación de LabVIEW inserte el bloque que configura la tarjeta adquisición para que lea las señales analógicas del sistema hidráulico así:



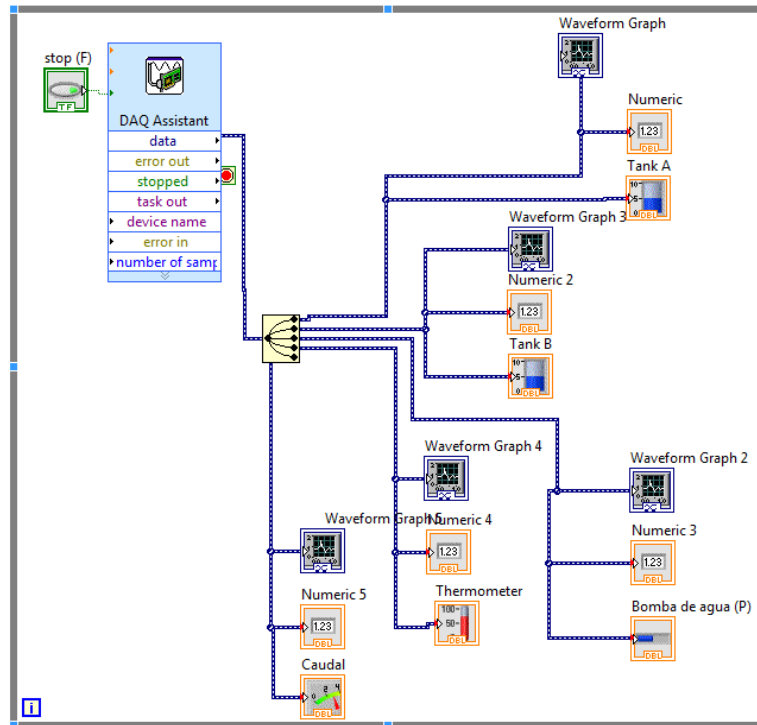
- 6.3.3 Una vez seleccionado el bloque, configúrelo para que lea la señal de voltaje correspondiente al acondicionamiento del sensor (tenga en cuenta el orden de conexión entre la señal de salida de voltaje de la planta y el canal analógico de entrada de la tarjeta AIx).



6.3.4 Configure los parámetros del canal en cómo va a ser leída la señal de voltaje (en este caso un rango de 0 a 10 Volts y configuración de la terminal puesta a tierra *RSE*).



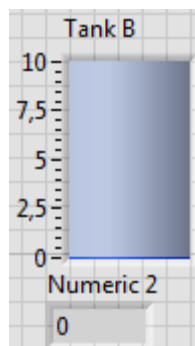
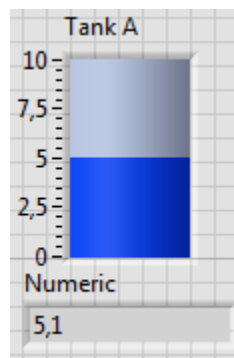
6.3.5 Inserte el bloque de programación en el panel correspondiente del proyecto, emplee la herramienta “*Split Signals*” para leer las señales de salida de la planta desde el canal A0 hasta el A4.



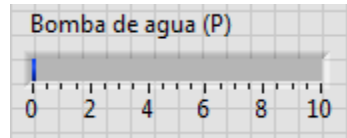
#### 6.4 Elementos gráficos para la visualización de señales de la planta

Una vez que las señales de la planta se hayan adquirido con ayuda de la tarjeta NI-6008, en el panel frontal adecue los elementos necesarios para la medida:

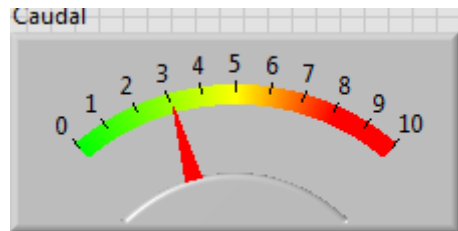
- Visualización de la señal acondicionada y procesada de los tanques A y B.



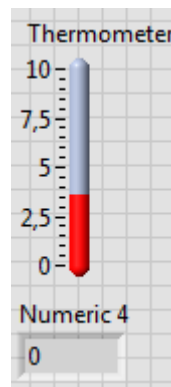
- Indicador de presión P (en voltaje) que proporciona la bomba sumergible de agua, el más indicado para emplear en el panel frontal del software es el *slide* horizontal.



- Para la señal correspondiente al caudal, se emplea un medidor o indicador el cual muestre el valor de la señal acondicionada en voltaje (0 a 10 Volts).

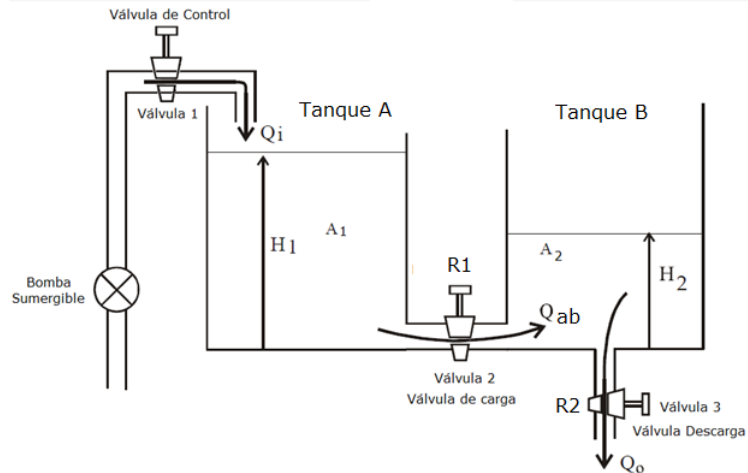


- Respecto a la visualización de la señal acondicionada de temperatura, el software ofrece la siguiente herramienta de visualización, cabe aclarar que dependerá de la temperatura del reservorio principal.



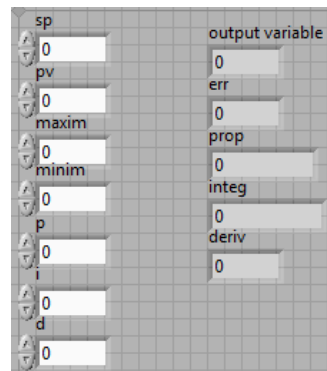
### 6.5 Herramientas para el control

De acuerdo al modelo planteado a continuación, implemente los lazos de control a los tanques A y B con los bloques PID que ofrece LabVIEW



### 6.5.1 Bloques de sintonización PID,

Estos bloques se encargan de implementar el control por medio de voltajes, y es necesario agregar al bloque instrucciones de control para sintonizar las variables que integran este tipo de control: Proporcional, Integral y Derivativo



- Setpoint: Es el valor de referencia que se desea
- Process variable: Variable a procesar en Volts (señal del sensor)
- Maximum: Rango máximo a que puede llegar el control

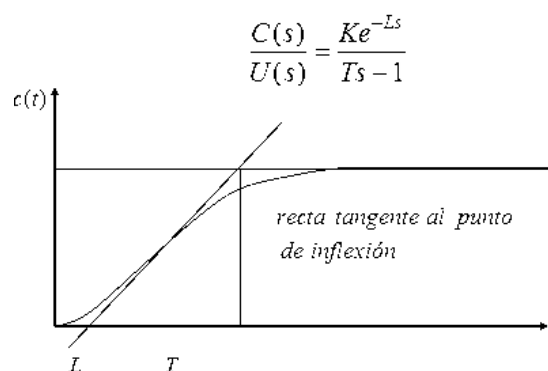


- Minimum: Rango mínimo a que puede llegar el control
- Proportional: Variable de sintonización “proporcional”
- Integral: Variable de sintonización “integral”
- Derivative: Variable de sintonización “derivativa”
- Output variable: Variable de salida (actuador)

Realice el control de la planta de tal manera que se adecúe a las exigencias establecidas, recuerde que los bloques de la tarjeta de adquisición, tanto de lectura como de escritura de voltaje deben estar involucrados en la rutina de control

### 6.5.2 Método de sintonización

Para la sintonización de controladores tipo PID hay diversos métodos, pero el más clásico y empleado en este ámbito es el método Ziegler Nichols, esto es por su facilidad en la obtención de las variables de sintonización y practicidad a la hora de implementar. Para la sintonización se requiere en primera instancia, el comportamiento de la respuesta en la planta ante una entrada escalón, dependiendo de la curva de la respuesta se realizan los cálculos necesarios para obtener los valores de sintonización.



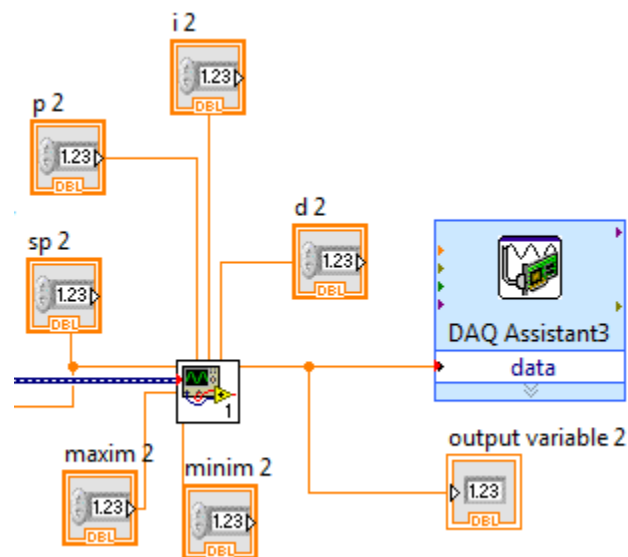
Una vez trazada la recta en la respuesta de la planta, calcule las distancias y complete los datos:

$$k_p = 1.2 \frac{T}{L}$$

$$\tau_i = 2L$$

$$\tau_d = 0.5L$$

Introduzca los valores calculados en las instrucciones de control del bloque “PID” en LabVIEW, sintonice y adecue los valores de tal manera que la respuesta del control de nivel en los tanques A y B sea la más óptima.



### 6.6 Precauciones y sugerencias

- La válvula 1 debe ser accionada por medio de un rango de voltaje de 0 a 5 Volts, es indispensable una fuente variable de voltaje
- Las válvulas 2 y 3 deben estar ligadas al control que proporciona la tarjeta de adquisición
- Cada actuador debe tener un bloque de control PID
- La válvula de bola manual se encarga de desocupar los tanque A y B

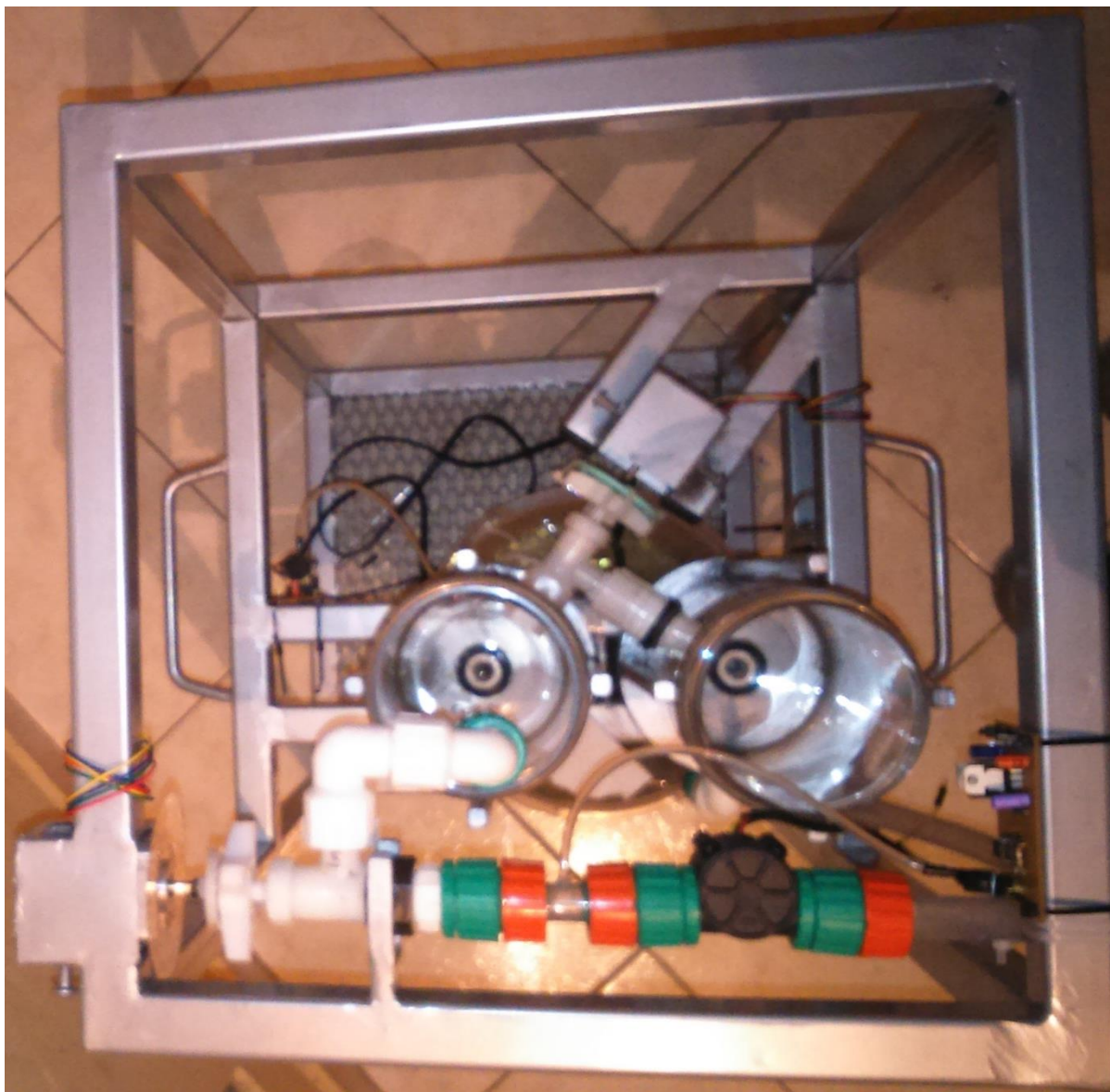
## 7 INFORME

Realice un informe el cual se evidencie el proceso de la práctica. En el informe se debe detallar el proceso de programación, curvas de respuesta, resultados obtenidos de la práctica y conclusiones del que dejó el proceso de control

## 8 REFERENCIAS

- José Acedo Sánchez. (2006). instrumentación y control básico de procesos. España: Díaz de santos.
- OGATA, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson.
- Bastidas, Christian, A., & Medina, William, E. (2017). Construcción del prototipo de una planta para el control de procesos industriales, como apoyo en las prácticas del área de control de la licenciatura en electrónica. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá Colombia.

**ANEXO B: ILUSTRACIONES DE LA ESTRUCTURA DE LA PLANTA JUNTO CON  
SUS ACTUADORES (BOMBA SUMERGIBLE Y VÁLVULAS)**



Vista superior de la estructura



Vista frontal de la estructura

## FICHA TÉCNICA

Bomba sumergible para fuentes de ornato y estanques de 45 W



MODELO

AQUA45W

CARACTERÍSTICA ESPECIAL

Compacta y duradera

MARCA

EVANS

CATEGORÍA

Bombas para Fuente



## MOTOR

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Tipo de Motor      | Eléctrico  |
| Potencia del Motor | 0.10 hp    |
| RPM del Motor      | 3450 RPM   |
| Voltaje            | 120 V      |
| Fases del motor    | Monofásico |

## USOS

Ideal para fuentes de ornato, acuarios y peceras. Ideal para la recirculación de agua en fuentes y acuarios. Caídas y cortinas de agua.

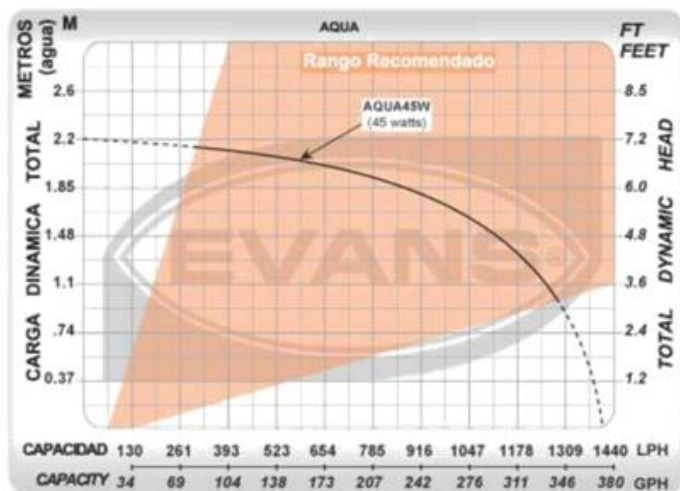
## BOMBA

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Tipo de Bomba                      | De fuente                                   |
| Flujo Óptimo                       | 15.00 LPM                                   |
| Altura Óptima                      | 2.00 m                                      |
| Numero de etapas                   | 1 etapas                                    |
| <u>Diametro de succión</u>         | 0.75 pulg                                   |
| <u>Diametro de descarga</u>        | 0.50 pulg                                   |
| Tipo de impulsor                   | abierto                                     |
| Material del cuerpo                | Plástico                                    |
| Material del impulsor              | Plástico                                    |
| Material del sello <u>mecánico</u> | Cerámica / Carbón / Acero inoxidable / Buna |

## BENEFICIOS

Incluye adaptador para mangueras

## FICHA TÉCNICA



MODELO

AQUA45W

CARACTERÍSTICA ESPECIAL

Compacta y duradera

MARCA

EVANS

CATEGORÍA

Bombas para Fuente

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Temperatura <u>Maxima</u> del Agua | 40 C                    |
| Incluye                            | Adaptador para manguera |

## INFORMACION ADICIONAL

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| <u>Garantía</u>      | 1 año                   |
| <u>Certificación</u> | NOM / ANCE              |
| <u>Dimensiones</u>   | 11.00 X 8.00 X 11.00 cm |
| <u>Peso</u>          | 1.10 kg                 |



Válvula de regulación Grival para 1/2"