

Diseño prototipo banco de pruebas de presión de 0 a 100 Psig para transmisores de presión  
con salida analógica 4 a 20 mA para la empresa Hidrocasanare

Yair Andrés Barón Peña

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI  
Ingeniería Electrónica  
Yopal  
2019

Diseño prototipo banco de pruebas de presión de 0 a 100 Psig para transmisores de presión  
con salida analógica 4 a 20 mA para la empresa Hidrocasanare

Autor

Yair Andrés Barón Peña

Proyecto Aplicado para Optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Adriana del Pilar Noguera Torres

Ing. Electrónica. Esp en Automatización Industrial

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

Yopal

2019

## Resumen

El departamento de mantenimiento de la empresa Hidrocasanare, identificó la necesidad de optimizar la ejecución de la actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión, actividad de mantenimiento recurrente debido a la cantidad de transmisores de presión que hay en la planta y la importancia de los mismos para el proceso; con base a esta condición se determina que es necesario diseñar un prototipo de un banco de pruebas para transmisores de presión.

El prototipo del banco de presión, debe permitir ejecutar la verificación y ajuste de los transmisores de presión reemplazando al equipo encargado de generar la presión para los diferentes puntos de prueba de manera ascendente como descendente, en un tiempo relativamente corto, garantizando la estabilidad de la presión y la precisión al llegar a dichos puntos de presión, según los lineamientos dados procedimiento interno de la empresa “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN MANOMETRICA” su versión más vigente o el requerimiento directo del supervisor de mantenimiento.

La implementación del prototipo garantizará la optimización de la actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión ejecutándola en menos tiempo optimizando con ello las horas hombre invertidas para la actividad y aumentando el número de equipos que se pueden intervenir en los cortes de mantenimiento específicos.

### **Abstract**

The maintenance department of Hidrocasanare, identified the need to optimize the execution of the verification and adjustment activity of pressure transmitters, recurring maintenance activity due to the amount of pressure transmitters in the plant and the importance of same for the process; Based on this condition, it is determined that it is necessary to design a prototype of a test bench for pressure transmitters.

The prototype of the pressure bank must allow the verification and adjustment of the pressure transmitters to be carried out, replacing the equipment in charge of generating the pressure for the different test points upwards and downwards, in a relatively short time, guaranteeing the stability of the pressure and precision when reaching these pressure points, according to the guidelines given internal company procedure ““HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN MANOMETRICA” its most current version or the direct requirement of the supervisor of maintenance.

The implementation of the prototype will guarantee the optimization of the activity of verification and adjustment of pressure transmitters by executing it in less time, thereby optimizing the man hours invested for the activity and increasing the number of equipment that can be intervened in the specific maintenance cuts.



## **Agradecimientos**

Primeramente, agradezco a Dios, soy creyente fiel de que en este mundo no se mueve una hoja si no es por su gracia.

Quisiera agradecer a todas a aquellas personas, familiares, compañeros, colegas, docentes, que me han animado, me han brindado un consejo, me han corregido y de una u otra manera han aportado su grano de arena para que yo pudiera alcanzar este logro, realmente no puedo considerar esto como mi logro porque no es un logro solo mío, es un logro en conjunto con todas esas personas y hoy les agradezco.

No obstante, existen personas sin las cuales este trabajo de grado en esencia nunca se hubiera podido haber realizado y hoy quiero agradecerles a esas personas en particular:

Ingeniero Rafael Alberto Angarita Marín, supervisor de mantenimiento de la refinería HIDROCASANARE, futuro colega y un gran amigo, hoy quiero agradecerle por ese apoyo y compromiso incondicional prestado al desarrollo del proyecto, por la confianza depositada y sobre todo por el ánimo dado durante todo el proceso, nada de esto hubiera sido posible sin su apoyo por eso amigo gracias infinitas.

Paula Andrea Riveros Gaona, mi prometida, mi amiga, la persona que ha decidido compartir el resto de su vida conmigo, hoy le agradezco por estar siempre a mi lado especialmente durante el desarrollo de este proyecto, sin sus consejos, su compromiso con mi compromiso y su tolerancia, seguramente este proyecto no hubiera sido posible, por eso mi prometida y amiga gracias infinitas.

Ingeniera Adriana del Pilar Noguera Torres, docente en la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingeniería ECBTI de la UNAD, le agradezco por que, sin su guía, paciencia y compromiso con los estudiantes, este proyecto no hubiera sido posible, por eso gracias infinitas.

Con aprecio y cariño para todos Yair Andrés Barón Peña.

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 3  |
| Abstract.....  | 4  |
| Agradecimientos .....  | 5  |
| Tabla de contenido.....  | 6  |
| Lista de tablas .....  | 10 |
| Lista de figuras.....  | 12 |
| 1. Planteamiento del problema.....   | 15 |
| 2. Justificación .....   | 20 |
| 3. Objetivos.....  | 23 |
| 3.1. Objetivo general .....  | 23 |
| 3.2. Objetivos específicos.....  | 23 |
| 4. Marco conceptual y teórico.....   | 24 |
| 4.1. La presión.....   | 24 |
| 4.1.1. Clases de presión.....  | 26 |
| 4.1.2. Clases de sensores para medir presión.....  | 28 |
| 4.1.3. Sensores para medir la presión. ....  | 28 |
| 4.1.4. Transmisores de presión. ....   | 32 |
| 4.2. Instrumentos de presión en la industria.....  | 33 |
| 4.2.1. Importancia de la calibración y verificación de instrumentos como transmisores de presión.....                  | 33 |
| 4.2.2. Conceptos relevantes al momento de calibrar, ajustar y verificar instrumentos como transmisores de presión..... | 37 |
| 4.2.3. Proceso de calibración verificación y ajuste de transmisores de presión. ....                                   | 39 |
| 4.3. El control.....   | 44 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.3.1. | Sistemas de control. ....   | 44 |
| 4.3.2. | Tipos de control. ....  | 47 |
| 4.4.   | Sistemas de control avanzado .....  | 53 |
| 4.4.2. | Válvulas de control. ....   | 56 |
| 4.5.   | Diseño de prototipos.....   | 56 |
| 4.5.1. | Tipos de prototipos .....   | 57 |
| 5.     | Metodología .....   | 58 |
| 6.     | Identificación de las necesidades del cliente .....   | 60 |
| 6.1.   | Actividades y tareas .....  | 60 |
| 6.1.1. | Actividad uno: Obtener los requisitos de los interesados. ....                                  | 60 |
| 6.1.2. | Desarrollo actividad uno: Obtener los requisitos de los interesados. ....                       | 61 |
| 6.1.3. | Actividad dos: Definir los requisitos de las partes interesadas.....                            | 63 |
| 6.1.4. | Desarrollo actividad dos: Definir los requisitos de las partes interesadas. ....                | 63 |
| 6.1.5. | Actividad dos: Analizar y mantener los requerimientos de los grupos de interés.                 |    |
|        | 67  |    |
| 6.1.6. | Desarrollo actividad dos: Analizar y mantener los requerimientos de los grupos de interés. .... | 67 |
| 7.     | Definición de especificaciones .....  | 70 |
| 7.1.   | Actividades y tareas .....  | 71 |
| 7.1.1. | Actividad: Definir las especificaciones y/o requisitos del prototipo. ....                      | 71 |
| 7.1.2. | Desarrollo actividad: Definir las especificaciones y/o requisitos del prototipo.                | 71 |
| 8.     | Generación de concepto .....  | 79 |
| 8.1.   | Actividades y tareas .....  | 79 |
| 8.1.1. | Actividad uno: Aclarar el problema.....   | 79 |
| 8.1.2. | Desarrollo actividad uno: Aclarar el problema. ....   | 80 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 8.1.3.  | Actividad dos: Buscar externamente. ....                                       | 83  |
| 8.1.4.  | Desarrollo actividad dos: Buscar externamente.....                             | 83  |
| 8.1.5.  | Actividad dos: Buscar internamente. ....                                       | 89  |
| 8.1.6.  | Desarrollo actividad dos: Buscar internamente. ....                            | 89  |
| 8.1.7.  | Actividad cuatro: Explorar sistemáticamente. ....                              | 90  |
| 8.1.8.  | Desarrollo actividad cuatro: Explorar sistemáticamente. ....                   | 91  |
| 8.1.9.  | Actividad cinco: Reflexionar sobre las soluciones y el proceso.....            | 96  |
| 8.1.10. | Desarrollo actividad cinco: Reflexionar sobre las soluciones y el proceso. ..  | 96  |
| 9.      | Selección del concepto.....  | 98  |
| 9.1.    | Actividades y tareas .....   | 98  |
| 9.1.1.  | Actividad uno: Filtrado de conceptos. ....                                     | 98  |
| 9.1.2.  | Desarrollo actividad uno: Filtrado de conceptos. ....                          | 99  |
| 9.1.3.  | Actividad dos: Definir teoría de funcionamiento del prototipo. ....            | 102 |
| 9.1.4.  | Desarrollo actividad dos: Definir teoría de funcionamiento del prototipo. .... | 102 |
| 10.     | Construcción del prototipo.....  | 105 |
| 10.1.   | Actividades y tareas.....  | 105 |
| 10.1.1. | Actividad uno: Definir el tipo de prototipo a construir.....                   | 106 |
| 10.1.2. | Desarrollo actividad uno: Definir el tipo de prototipo a construir. ....       | 106 |
| 10.1.3. | Actividad dos: Planear la construcción del prototipo.....                      | 107 |
| 10.1.4. | Actividad dos: Evidenciar la construcción del prototipo. ....                  | 111 |
| 10.1.5. | Desarrollo actividad dos: Evidenciar la construcción del prototipo. ....       | 111 |
| 11.     | Prueba del prototipo.....  | 138 |
| 11.1.   | Actividades y tareas.....  | 138 |
| 11.1.1. | Actividad uno: Ejecución y registro de pruebas experimentales. ....            | 138 |
| 11.1.2. | Desarrollo actividad uno: Ejecución y registro de pruebas experimentales. .... | 139 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 11.1.3. | Actividad dos: Análisis de resultados. ....  | 147 |
| 11.1.4. | Desarrollo actividad dos: Análisis de resultados.....  | 147 |
| 12.     | Conclusiones .....   | 149 |
|         | Bibliografía .....   | 151 |
|         | Anexos .....   | 153 |
|         | Anexo A: “Circular informática interna área de mantenimiento” .....  | 153 |
|         | Anexo B: “Informe de inspección de hallazgos de falla de equipos de la refinería de<br>HIDROCASANARE”.....                                   | 154 |
|         | Anexo C: “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO<br>TRASMISORES DE PRESIÓN”, páginas 4 a 7 d 8 del documento original. .... | 155 |
|         | Anexo D “Informe de mantenimiento mes de enero del 2019 Hidrocasanare”, pagina 9 de<br>10 del documento original. ....                       | 159 |

### Lista de tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1 Ventajas y desventajas de los sensores de presión. ....  | 29  |
| Tabla 2 Ventajas y desventajas sensores de presión resonante de silicona. ....                               | 31  |
| Tabla 3 Requisitos de las partes interesadas en el desarrollo del proyecto. ....                             | 62  |
| Tabla 4 Requerimientos inevitables de las partes interesadas. ....   | 73  |
| Tabla 5 Métrica asociada a cada requerimiento.....   | 74  |
| Tabla 6 Valores meta ideales y marginalmente aceptables. ....  | 77  |
| Tabla 7 Análisis criticidad de subprocesos. ....   | 81  |
| Tabla 8 Comparación prototipo y productos existentes.....  | 87  |
| Tabla 9 Propuestas búsqueda interna.....   | 89  |
| Tabla 10 Tabla para combinación de conceptos. ....   | 92  |
| Tabla 11 Primera combinación de conceptos posible.....   | 93  |
| Tabla 12 Segunda combinación de conceptos posible.....   | 94  |
| Tabla 13 Tercera combinación de conceptos posible. ....  | 95  |
| Tabla 14 Cuarta combinación de conceptos posible.....  | 95  |
| Tabla 15 Bosquejo plan experimental.....   | 108 |
| Tabla 16 Planeación del prototipo. ....  | 110 |
| Tabla 17 Listado materiales disponibles construcción prototipo.....  | 112 |
| Tabla 18 Funciones de membresía y reglas archivo uno presurización en unidades de PSIG.....                  | 132 |
| Tabla 19 Funciones de membresía y reglas archivo dos despresurización en unidades de Psig.....               | 133 |
| Tabla 20 Funciones de membresía y reglas archivo tres presurizaciones en unidades de INH <sub>2</sub> O..... | 134 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 21 Funciones de membresía y reglas archivo cuatro despresurizaciones en unidades de INH <sub>2</sub> O..... | 134 |
| Tabla 22 Lista de chequeo cumplimiento de especificaciones prueba uno. ....                                       | 142 |
| Tabla 23 Registro resultados prueba dos. ....   | 144 |
| Tabla 24 Registro resultados prueba tres. ....  | 145 |
| Tabla 25 Lista de chequeo cumplimiento de especificaciones prueba cuatro. ....                                    | 146 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Unidades de presión. ....   | 26 |
| Figura 2. Diferentes tipos de presión. ....                                 | 27 |
| Figura 3. Sensor de presión tipo capacitivo. ....                           | 29 |
| Figura 4. Sensor de presión resonante de silicona. ....                     | 31 |
| Figura 5. Algunos transductores de presión. ....                            | 32 |
| Figura 6. Calibración de un manómetro usando un peso muerto. ....           | 41 |
| Figura 7. Peso muerto. ....   | 42 |
| Figura 8. Sistema de calibración portátil WIKA PCS-H 1000. ....             | 43 |
| Figura 9. Calibrador portátil descrito por Creus. ....                      | 43 |
| Figura 10. Sistema de lazo abierto. ....                                    | 45 |
| Figura 11. Diagrama de un sistema retroalimentado. ....                     | 45 |
| Figura 12. Control proporcional de tiempo variable. ....                    | 50 |
| Figura 13. Control PID comparación. ....                                    | 52 |
| Figura 14. Tipos de prototipos. ....  | 57 |
| Figura 15. Identificación partes interesadas. ....                          | 61 |
| Figura 16. Bomba de prueba neumática 700PTP-1. ....                         | 72 |
| Figura 17. Matriz requerimiento vs métrica. ....                            | 76 |
| Figura 18. Caja negra descomposición funcional prototipo. ....              | 80 |
| Figura 19. Diagrama de sub funciones prototipo. ....                        | 81 |
| Figura 20. Ejemplo de equipo de control preciso de presión automático. .... | 85 |
| Figura 21. CPC8000. ....  | 86 |
| Figura 22. Controlador 8270A y 8370A. ....                                  | 86 |
| Figura 23. Inflador digital de neumáticos 12VDC AUDEW. ....                 | 86 |
| Figura 24. Árbol de clasificación de concepto del subproceso crítico. ....  | 91 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 25. Matriz de selección de concepto.....  | 99  |
| Figura 26. Evaluación de conceptos. ....   | 100 |
| Figura 27. Matriz de evaluación de conceptos completada. ....  | 101 |
| Figura 28. Esquema funcional del prototipo.....  | 103 |
| Figura 29. Esquema funcional del prototipo agrupado en trozos. ....                                    | 103 |
| Figura 30. Diagrama aproximado prototipo.....  | 104 |
| Figura 31. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico uno.....                                  | 114 |
| Figura 32. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico dos. ....                                 | 114 |
| Figura 33. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico tres. ....                                | 115 |
| Figura 34. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico cuatro. ....                              | 115 |
| Figura 35. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico cinco.. ....                              | 115 |
| Figura 36. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico uno.. ....                             | 116 |
| Figura 37. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico dos.. ....                             | 116 |
| Figura 38. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico tres.. ....                            | 117 |
| Figura 39. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico uno.. ....                             | 117 |
| Figura 40. Automatización válvula presurización y despresurización, registro<br>fotográfico uno.....   | 118 |
| Figura 41. Automatización válvula presurización y despresurización, registro<br>fotográfico dos.. .... | 118 |
| Figura 42. Automatización válvula presurización y despresurización, registro<br>fotográfico tres. .... | 118 |
| Figura 43. Panel frontal.....  | 119 |
| Figura 44. Panel frontal: Parámetros de configuración inicial.. ....                                   | 120 |
| Figura 45. Panel frontal: Variables de control. ....   | 121 |
| Figura 46. Panel frontal: Operación y monitoreo. ....  | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 47. Diagrama de bloques general. ....   | 122 |
| Figura 48. Diagrama de bloques: Control de entradas y salidas del Arduino.....                       | 123 |
| Figura 49. Diagrama de bloques: Linealización del PIT. ....  | 123 |
| Figura 50. Diagrama de bloques: Conversión de unidades de ingeniería EU. ....                        | 124 |
| Figura 51. Diagrama de bloques: Conversión de set-point en % de span.....                            | 124 |
| Figura 52. Diagrama de bloques: Cálculo del error %.....   | 125 |
| Figura 53. Diagrama de bloques: Cálculo de la deriva. ....   | 125 |
| Figura 54. Diagrama de bloques: Lógica de control.....   | 126 |
| Figura 55. Diagrama de bloques: Porcentaje de apertura servos a valor real en<br>microsegundos. .... | 127 |
| Figura 56. Diagrama de bloques para desarrollar metodología de la lógica difusa...                   | 128 |
| Figura 57. Entradas y salidas del controlador.....   | 129 |
| Figura 58. Función de membrecía error en % de span. ....   | 129 |
| Figura 59. Función de membrecía deriva de presión en % span .....                                    | 130 |
| Figura 60. Función de membrecía % apertura válvula. ....   | 130 |
| Figura 61. Matriz de reglas difusas.....   | 131 |
| Figura 62. "Test System" del TOOLS de LabVIEW "Fuzzy System Designer".. ....                         | 131 |
| Figura 63. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico uno....                 | 136 |
| Figura 64. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico dos. ...                | 136 |
| Figura 65. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico tres. ...               | 136 |
| Figura 66. Integración final componentes prototipo, registro fotográfico cuatro.....                 | 137 |
| Figura 67. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico cinco..                 | 137 |
| Figura 68. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico seis....                | 137 |

## 1. Planteamiento del problema

Es un hecho innegable que la economía de nuestro país depende en una gran parte de la exploración y producción de hidrocarburos, (Otero Parada, 2018) deja ver en su trabajo “El papel del petróleo en la economía colombiana” que el sector de los hidrocarburos ratifica su importancia para el país por las altas rentas que produce en forma de exportaciones, impuestos y regalías, el autor resalta que no hay un sector que de rentas más altas en el país.

El sector de la refinación de hidrocarburos llamado por (Otero Parada, 2018) en su libro como el sector de manufacturero de los hidrocarburos, comprendido por refinación y petroquímica genera un número significativo de empleos de mano de obra calificada de profesionales y técnicos, llegando a los 59705 entre empleos directos e indirectos para el año 2017(cifras tomadas de (Otero Parada, 2018, pág. 18) quien a subes cita su fuentes DANE, ACP, EITI y ANH).

La refinería de hidrocarburos “Hidrocarburos del Casanare S.A.S” de ahora en adelante Hidrocasanare, hace parte de este sector manufacturero de los hidrocarburos y contribuye a las cifras de empleo y rentas del país, la planta de refinación de Hidrocasanare se encuentra ubicada en el municipio de Yopal departamento de Casanare, más exactamente en el km 16 vía Yopal-Paz De Ariporo, contiguo al basurero El Cascajar, en dicha planta el control de procesos es fundamental para su correcta operación y para la seguridad de la planta, y el mantenimiento de los equipos y sensores que permiten dicho control es una prioridad para la compañía.

El departamento de mantenimiento de la planta de refinación, específicamente el área de instrumentación, es la encargada de realizar el mantenimiento de dichos equipos, esto se refleja en un gran número de equipos e instrumentos a mantener entre los cuales y específicamente los instrumentos transmisores de presión con salida analógica 4 a 20 mA representan la gran mayoría, la importancia de los transmisores de presión dentro del proceso

y su popularidad o gran presencia en el mismo se debe a que la variable medida de la presión como lo indica (Cassiolato, 2008) en su trabajo “Medición de presión: todo el que usted necesita conocer” es una variable o magnitud base para la medición y control de variables como el caudal , nivel, densidad, entre otras, razón por la cual los transmisores de presión se encuentran distribuidos a través de toda la planta y son usados para el monitoreo y control de la variables de presión, flujo y nivel del proceso de refinación de los hidrocarburos.

Así como (WIKA Instrument Corporation, 2008) en su libro “Manual de WIKA Medición de presión y temperatura” hace gran énfasis en la importancia de calibrar regularmente los instrumentos, afirmando que la presión es una de las variables de medida más importantes en los procesos de producción industrial, la calidad del producto, la seguridad operativa y la economía están casi siempre vinculadas directamente con el registro preciso y confiable de estas variables de proceso y la presión es una de ellas, en el mismo documento (WIKA Instrument Corporation, 2008) deja claro que condiciones de trabajo resistentes, como el estrés mecánico continuo y extremo a través de golpes y vibraciones, las altas temperaturas influyen en la precisión y confiabilidad de los instrumentos de medición de presión, es normal que después de solo uno o dos años de servicio, la confiabilidad de dicha medición entre en duda y dichas dudas solo se pueden despejar con una calibración y verificación regular de los equipos, en concordancia Hidrocasanare cuenta con planes de mantenimiento definidos para asegurar el buen funcionamiento de los equipos y a su vez dar cumplimiento a los requerimientos de la norma de calidad NTC-ISO 9001-2015 en cuanto a la trazabilidad de las mediciones consideradas importantes para el proceso, en donde calibrar o verificar, o ambas, los equipos de medición a intervalos especificados, es un requisito fundamental (ICONTEC, 2015).

El plan de mantenimiento para los transmisores de presión de la planta de refinación de hidrocarburos Hidrocasanare, se encuentra descrito en el procedimiento interno “HC-SIG-

MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN Manométrica”, en dicho procedimiento se dan los lineamientos y frecuencias con que se deben realizar las actividades de mantenimiento para dichos equipos, dentro de estas actividades se resalta en específico la verificación y ajuste de los trasmisores de presión que en concordancia con autores como (Creus Solé, 2010), (WIKA Instrument Corporation, 2008) y como se indica en el mismo documento, consiste en someter los instrumentos de presión a presiones controladas, a través de todo el rango de presión de operación de manera ascendente y descendente, verificando la lectura del instrumento al compararla con la lectura de un patrón de trabajo, dicho patrón de presión debe estar calibrado y ser trazable metrológicamente por un laboratorio con acreditación ONAC (Organismo Nacional de Acreditación para Colombia) tal como indica su definición en VIM “Vocabulario Internacional de Metrología” (Centro Español de Metrología CEM, 2012).

El proceso de verificación y ajuste de los instrumentos de presión que se realiza actualmente en Hidrocasanare es totalmente manual, se utiliza como fuente de aire comprimido una bomba neumática tipo pistón manual y como controlador de presión el operador que utiliza dicha bomba, este proceso consume 6 horas hombre por equipo, tiempo elevado teniendo en cuenta la cantidad de equipos de esta clase a mantener en la plata, esta condición se debe principalmente a que la presurización del sistema es proporcional a la capacidad de la bomba y la misma es diseñada de tamaño pequeño y poco caudal de inyección o presurización para facilitar su operación, adicionalmente el proceso de estabilización aunque preciso por instantes es lento y no siempre se logra mantener la presión estable durante un periodo de tiempo mínimo para realizar la toma de los datos de verificación, debido a que no se cuenta con un volumen suficiente de área presurizada gracias al diseño compacto de la bomba como ya se especificó anteriormente.

El problema en cuestión es el tiempo en horas hombre excesivo que se requiere actualmente para ejecutar el proceso de verificación y calibración de los instrumentos de presión, debido a la ejecución manual del proceso de presurización y despresurización requerido en dicha actividad, generando como consecuencia el no cumplimiento del plan de aseguramiento de los instrumentos de medición de la plata de acuerdo el plan de mantenimiento anual. esta situación se presenta a través de toda la industria, sin embargo en busca de una solución a esta condición, (Wiegand & Elbert, 2012) en su trabajo “Fundamentos de la tecnología de calibración, instrumentos de referencia para presión y temperatura, calibración profesional” proponen y cito textualmente “La rentabilidad de la calibración de los instrumentos de medición de presión y de su documentación depende del nivel de automatización posible” (Wiegand & Elbert, 2012, pág. 34), esta propuesta es bien recibida por el personal de mantenimiento en general y de manera específica por el ingeniero Rafael Alberto Angarita Marín, supervisor de mantenimiento de la planta de refinación de Hidrocasanare, quien a través de circular informática interna del área de mantenimiento con fecha del 18 de septiembre de 2018, invita al personal técnico del área de instrumentación de la planta a presentar propuestas de optimización de tiempos de ejecución de las actividades de mantenimiento, a partir del diseño, la automatización o cambio de tecnologías utilizadas para el desarrollo de las mismas.

De acuerdo al problema planteado y a la necesidad de darle solución, expresada por el supervisor de mantenimiento de Hidrocasanare, ingeniero Rafael Alberto Angarita Marín, a través del “informe de inspección hallazgos HC-SIG-MSN-IHH-001” el 05 de octubre del 2018 se presenta formalmente la propuesta de diseñar un sistema automatizado para optimizar el procedimiento o actividad de verificación y ajuste de los transmisores de presión de la planta, la propuesta en cuestión indica que la automatización del proceso de

presurización y despresurización aportara en gran medida a la disminución de las horas hombre invertidas en dicha actividad.

## 2. Justificación

La variable de presión es una de las variables de medida más importantes en los procesos de producción industrial, la calidad del producto, la seguridad operativa y la economía están casi siempre vinculadas directamente con el registro preciso y confiable de estas variable de proceso (WIKA Instrument Corporation, 2008), para Hidrocasanare esto es un hecho y lo refuerzan con el cumplimiento de los requerimientos de la norma de calidad NTC-ISO 9001-2015 en cuanto a la trazabilidad de las mediciones consideradas importantes para el proceso, en donde calibrar o verificar, o ambas, los equipos de medición a intervalos especificados, es un requisito fundamental (ICONTEC, 2015)

Como indica el ingeniero Rafael Alberto Angarita Marín, supervisor de mantenimiento de la planta de refinación de Hidrocasanare, a través de circular informativa interna del área de mantenimiento con fecha del 18 de septiembre de 2018, es una necesidad buscar alternativas de optimización de los procesos y actividades de mantenimiento que contribuyan a la disminución de las horas hombre invertidas en dichas actividades y poder cumplir con el aseguramiento total de los instrumentos plasmado en el plan de mantenimiento anual de la compañía.

La propuesta presentada en el “informe de inspección hallazgos HC-SIG-MSN-IHH-001” el 05 de octubre del 2018, contempla la automatización del proceso de presurización y despresurización necesario para la ejecución de la actividad de verificación y ajuste de los instrumentos transmisores de presión, sin embargo, este no es una propuesta novedosa, puesto que ya existen equipos en el mercado que desarrollan esta misma función y son conocidos como controladores de presión, a manera de ejemplo se citan dos cada uno de diferente fabricante, en primer lugar se tiene el controlador de presión marca MENSOR modelo CPC4000, en (Total Temperature Instrumentation, Inc (DBA Instrumart), 2019) se encuentran las características detalladas de este equipo y su costo el cual incluyendo los



accesorios mínimos necesarios para su operación es de 8,429\$ dólares aproximadamente 26'129,900\$ pesos (tasa de cambio 1 dólar = 3,100 Pesos), en segundo se tiene a GE Druck con su controlador de presión modular modelo PACE5000/PACE6000, en (Total Temperature Instrumentation, Inc. (DBA Instrumart), 2019) se encuentran las características detalladas de este equipo y su costo el cual incluyendo los accesorios mínimos necesarios para su operación es de 8,207\$ dólares aproximadamente 25'441,700\$ pesos (tasa de cambio 1 dólar = 3,100 Pesos), según se indica en la circular informativa interna del área de mantenimiento con fecha del 18 de septiembre de 2018, el presupuesto máximo para estas mejoras es de 10'000,000\$ pesos colombianos, valor muy por debajo del costo de los equipos con estas características que se pueden encontrar en el mercado, adicionalmente en la misma circular se invita a realizar propuesta de bajo costo y que contemplen en el mejor de los casos recursos ya adquiridos por la compañía que se encuentran almacenados en la bodega de la planta.

Teniendo en cuenta lo anterior es evidente la necesidad de Hidrocasanare de optimizar el proceso de verificación de los instrumentos transmisores de presión, con el objetivo de optimizar tiempos de ejecución de dicha actividad y con ello asegurar el mantenimiento de todos los equipos de este tipo en la planta, sin embargo también es claro que comprar un producto ya manufacturado por un fabricante estándar no es la solución a esta problemática debido a los altos costos y el presupuesto limitado determinado por la compañía para dar una solución a esta necesidad, esto hace evidente que la solución viable es la planteada a través del “informe de inspección hallazgos HC-SIG-MSN-IHH-001” el 05 de octubre del 2018, en donde se propone formalmente y en resumidas palabras el diseño de un Prototipo Banco de pruebas de presión de 0 a 100 PSIG para instrumentos transmisores de presión con salida analógica 4 a 20 mA, utilizando para ello insumos de bajo costo como lo son tarjetas de Desarrollo Arduino para adquisición de datos y el software LabVIEW para el procesamiento

y control del banco, adicionalmente abriendo la posibilidad a utilizar los recursos ya adquiridos por la compañía

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Diseñar un Prototipo de Banco de pruebas de presión de 0 a 100 PSIG para transmisores de presión con salida analógica 4 a 20 mA con el fin de optimizar proceso de verificación y ajuste de dichos instrumentos en la empresa Hidrocasanare.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Identificar los requisitos y especificaciones mínimas que debe cumplir el prototipo del banco de presión.
- Determinar la teoría de funcionamiento del prototipo del banco de presión.
- Diseñar de la estructura física necesaria para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo a la teoría de funcionamiento determinada.
- Diseñar el sistema de control necesario para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo a la teoría de funcionamiento determinada y las especificaciones y requisitos identificados.
- Diseñar la interfaz de operación y procesamiento para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo con las especificaciones y requisitos identificados.
- Validar el cumplimiento de los requisitos y especificaciones mínimas del banco de presión a través de distintas pruebas de verificación.
- Medir la efectiva disminución de horas hombre utilizadas para la verificación de los instrumentos transmisores de presión con la utilización del prototipo de banco de presión.

## 4. Marco conceptual y teórico

En este apartado se hace un recorrido por las principales elaboraciones conceptuales que soportan el proyecto de investigación. Es preciso señalar que dentro de los conceptos más importantes se encuentran los sensores de presión, la elaboración de prototipos, los instrumentos de verificación de la presión, los sistemas de control, la teoría y lo relacionado con la automatización.

### 4.1. La presión

El término presión se deriva del latín *pressio*, -onis que incluye acepciones como: acción de apretar, comprimir, ejercer influencia, acoso continuado entre otros. Pero por tratarse de un trabajo que incluye unidades de medida, se entiende la presión como “la magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie y cuya unidad en el sistema internacional es el pascal” (RAE, 2019). Para el sistema internacional el pascal equivale a “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  $1/\text{s}^2$ .” (Creus Solé, 2010, pág. 91).

La medición de la presión ha atraído la atención desde tiempo muy antiguo. A continuación (SMAR, 2019) relata un poco de esta historia:

A finales del siglo XVI, el italiano Galileo Galilei (1564-1642) obtuvo patente por un sistema de bomba de agua utilizada en la irrigación. En 1592, usando solamente un tubo de ensayo y una cuenca con agua, Galileo montó el primer termómetro. Él volcó un tubo con la boca hacia abajo, semisumergido en el líquido. Así, cuando el aire en el interior del tubo enfriaba, el volumen aumentaba y el agua era empujada hacia afuera. El nivel del agua, por lo tanto, medía la temperatura del aire. El núcleo de su bomba era un sistema de succión que descubrió tener la capacidad de elevar el agua en el máximo 10 metros.

En 1643, el físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) desarrolló el barómetro. Este aparato calculaba la presión atmosférica, o sea, la fuerza del aire sobre la superficie de la tierra. Él hizo una experiencia llenando un tubo de 1 metro con mercurio, sellado en uno de las extremidades y sumergido en una tina con mercurio en la otra. La columna de mercurio invariablemente bajaba hasta alrededor de 760 mm en el tubo. Sin saber la razón del fenómeno, él lo atribuyó a una fuerza existente en la superficie terrestre. Torricelli concluyó también que el espacio dejado por el mercurio en el inicio de la experiencia no contenía nada y lo llamó de “vacuum” (vacío). Cinco años más tarde, el francés Blaise Pascal usó el barómetro para mostrar que en el alto de las montañas la presión de aire era más pequeña. (SMAR, 2019).

Según (SMAR, 2019), en las últimas décadas gracias a los avances tecnológicos de las mismas se evidenció un gran aumento de diferentes equipos de presión destinados para variadas aplicaciones, sin embargo “La caracterización de presión solo tuvo su real valor reconocido a partir del momento que logramos traducirla en valores mensurables” (SMAR, 2019).

“La presión es la fuerza normal distribuida uniformemente en una superficie de área conocida” (Acedo, 2002, pág. 25), agrega que “la fuerza puede ser ocasionada por líquidos, gases, vapores o por cuerpos sólidos y su unidad de medida, en sistema internacional (SI) es el Newton” (Acedo, 2002, pág. 25). Así las cosas, “conocida esta fuerza y utilizando como unidad de superficie el metro cuadrado se obtiene como unidad de presión el Pascal, nombre debido al físico francés del siglo XVII, Blas Pascal” (Acedo, 2002, pág. 25). La presión en el sistema Internacional (S.I.) “está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas que tuvieron lugar en París en octubre de 1967 y 1971,” (Creus Solé, 2010, pág. 91) y “según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional

de Metrología Legal. El pascal es 1 newton por m<sup>2</sup> (1 N/m<sup>2</sup>), siendo el newton la fuerza aplicada a un cuerpo.” (Creus Solé, 2010, pág. 91).

La siguiente figura es un resumen de las unidades de presión más conocidas y sus equivalencias entre sí:

|                     | 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 × 10 <sup>5</sup> |
| 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 <sup>5</sup>          |
| Pa                  | 0,00014 | 0,0040                   | 0,00029                | 0,987 × 10 <sup>-5</sup> | 0,102 × 10 <sup>-4</sup> | 0,01           | 0,0075            | 10 <sup>-5</sup> | 1                        |

Figura 1. Unidades de presión. (Creus, 2010, pág. 91)

Debido a la influencia de Estados Unidos en las diferentes áreas de la industria colombiana, la principal unidad de presión usada es el PSI, sin embargo, con los sistemas de calidad estandarizados en las empresas, se ha optado cada vez más por implementar en las últimas décadas el uso del pascal y su importancia en la estandarización de procesos internacionales, así como en los instrumentos de presión construidos más recientemente los cuales vienen calibrados de fábrica en dichas unidades. Grandes fabricantes como Yokogawa, Rosemount, Honeywell, Fluke, entre otras, han optado por esta práctica.

#### 4.1.1. Clases de presión.

Existen varias clases de presión que se pueden medir, la definición de las mismas varía de interpretación entre autores, por tal motivo para objeto de este marco teórico se toma como referencia a (Acedo, 2002) cuya definición está más acorde a los fines de este trabajo y a los conceptos previos del autor, a continuación, se resaltan las comúnmente medidas en la industria.

- **Presión absoluta:** Presión referenciada a la falta de presión o vacío total, entiesase como vacío total un espacio cualquiera del universo sin presión, la presión absoluta no es más que la suma de la presión atmosférica y la presión relativa.
- **Presión atmosférica:** Generada por el peso de la atmosfera o aire que rodea la tierra hasta una altitud aproximada de 500 Km, la presión atmosférica varía de acuerdo a los cambios climáticos y a la altitud del nivel mar, se toma como valor medio del nivel del mar en donde es igual a  $1.0133 \times 10^5$  Pascales o 14.7 PSIA.
- **Presión relativa:** Presión referenciada a la presión atmosférica, es decir todo lo medido por encima de la presión atmosférica es presión relativa positiva y lo medido por debajo es presión relativa negativa. Esta es de las más utilizadas industrialmente.
- **Presión diferencial:** La diferencia entre dos presiones referenciadas a una misma presión, es decir presión relativa menos presión relativa o presión absoluta menos presión absoluta.

A continuación, se muestra las diferencias de las anteriores definiciones:

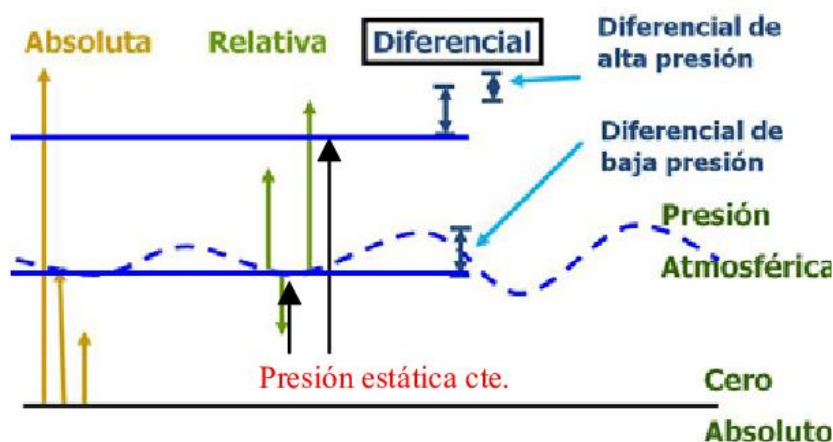


Figura 2. Diferentes tipos de presión. (Acedo, 2002, pág. 27)

#### **4.1.2. Clases de sensores para medir presión.**

Los sensores se dividen en dos clases principales de acuerdo al método de medición que utilicen el cual puede ser medición directa y medición indirecta, los instrumentos o sensores que miden la presión directamente determinan la magnitud de la presión con base a las ecuaciones físicas fundamentales de la misma es decir ecuación fundamental de la estática de fluidos, la teoría cinética de los gases y la termodinámica de los gases, aquellos que miden la presión indirectamente utilizan algún efecto secundario como lo es la deflexión elástica, el efecto óptico, el efecto eléctrico, etc, usualmente son transmisores que convierten la presión existente en la entrada en una señal de salida generalmente eléctrica o neumática (Acedo, 2002, pág. 43).

Otros autores definen los sensores como mecánicos para referirse a aquellos que miden la presión directamente y electromecánicos a aquellos que la miden indirectamente, no obstante, el principio de medición descrito por cada autor es el mismo (Creus Solé, 2010).

#### **4.1.3. Sensores para medir la presión.**

Los sensores capacitivos son los más usados y más confiables (Cassiolato, 2008) del mundo, sin embargo, esta afirmación se dio hace más de 10 años, actualmente el fabricante Yokogawa se ha puesto a la cabeza con sus sensores de presión resonantes de silicón.

**Sensor de Presión Capacitivo:** Un sensor de presión de capacitancia es básicamente un condensador grande formado por una placa fija y una placa móvil unidas a la salida mecánica de un diafragma (a través del fluido de llenado). Entre las placas hay un material dieléctrico. El sensor también tiene un circuito oscilador para energizar el capacitor y un circuito detector de capacitancia. Cuando el capacitor está energizado, los cambios de presión en el diafragma de proceso se transfieren hidráulicamente a la placa móvil, lo que provoca un cambio en la distancia entre las placas. La siguiente figura permite ver las especificaciones de este instrumento.



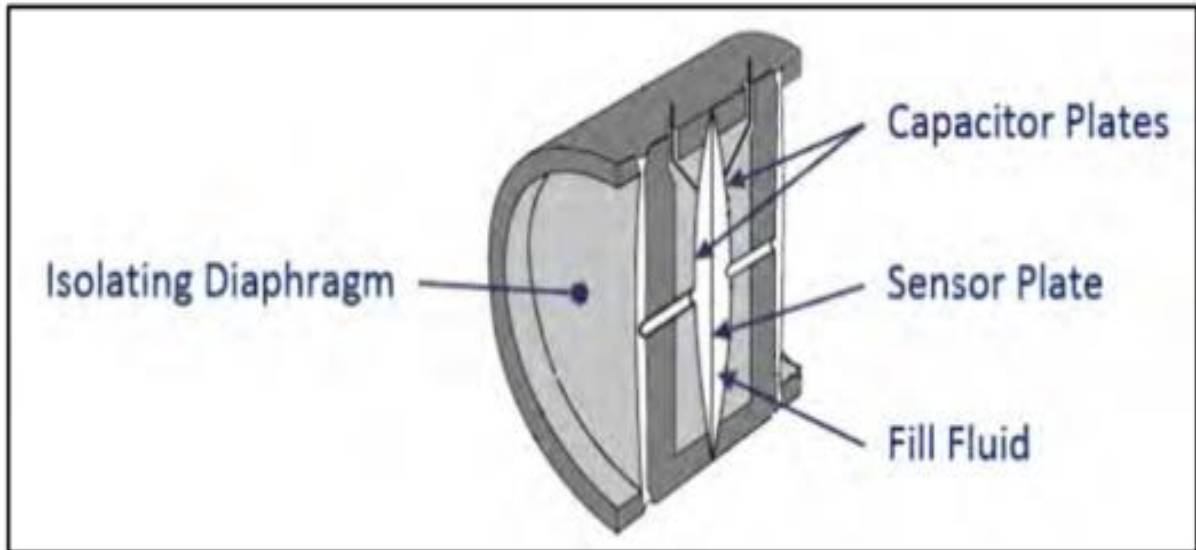


Figura 3. Sensor de presión tipo capacitivo. (Hamlett, 2016, pág. 13)

Este cambio en la distancia modifica la capacitancia entre las placas. El circuito detector de capacitancia detecta el cambio en la capacitancia. Los circuitos en el sensor se caracterizan por saber que un cambio en Y en la capacitancia es igual a un cambio en X en la presión. La señal de salida de este tipo de sensor es pequeña y analógica. Los circuitos detectores de capacitancia deben diseñarse cuidadosamente para eliminar los efectos de la capacitancia parásita. Al ser una señal analógica, se debe usar un convertidor A / D para convertir la señal a digital para que la usen los circuitos de proceso de los transmisores. (Hamlett, 2016).

La siguiente tabla permite establecer las diferencias entre las ventajas y las desventajas de los sensores de presión capacitivos.

Tabla 1

*Ventajas y desventajas de los sensores de presión.*

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|----------|-------------|
|----------|-------------|

---

|  |   |
|--|---|
| • Buen rendimiento a baja presión          | • Electrónicamente complejo   |
| • Buen rendimiento de rango de vacío       | • Mide solo una variable de proceso   |
| • Diseño maduro (usado por más de 50 años) | • Produce una señal de salida analógica (requiere convertidor A / D)  |
|  | • Baja relación señal / ruido • no maneja bien los eventos de sobrepresión  |
|  | • no tiene un sensor de temperatura para la compensación de temperatura (RTD debe estar ubicado fuera del sensor) |
|  | • Es un sensor pasivo.  |

---

*Fuente: Elaboración propia tomado de (Hamlett, 2016).*

***Sensor de Presión Resonante de silicona:*** Los sensores resonantes de silicio se fabrican a partir de un silicio de cristal único utilizando técnicas de micro mecanización de semiconductores 3D. Dos resonadores en forma de "H" están modelados en el sensor, cada uno operando a una salida de alta frecuencia. A medida que se aplica presión, los puentes se tensan simultáneamente, uno en compresión y otro en tensión. El cambio resultante en la frecuencia de resonancia produce una salida diferencial alta (kHz) directamente proporcional a la presión aplicada. Esta simple función basada en el tiempo es administrada por un microprocesador. El microprocesador puede recibir la señal digital directamente desde el sensor sin tener que pasar por un convertidor A/D. Esto mejora la precisión general del transmisor ya que, aunque pequeño, existe una cierta probabilidad de error en cada etapa de conversión. En una aplicación DP, el microprocesador también puede usar las dos frecuencias para determinar la presión estática. Por lo tanto, este sensor puede medir dos atributos de proceso diferentes con un solo sensor. (Hamlett, 2016).

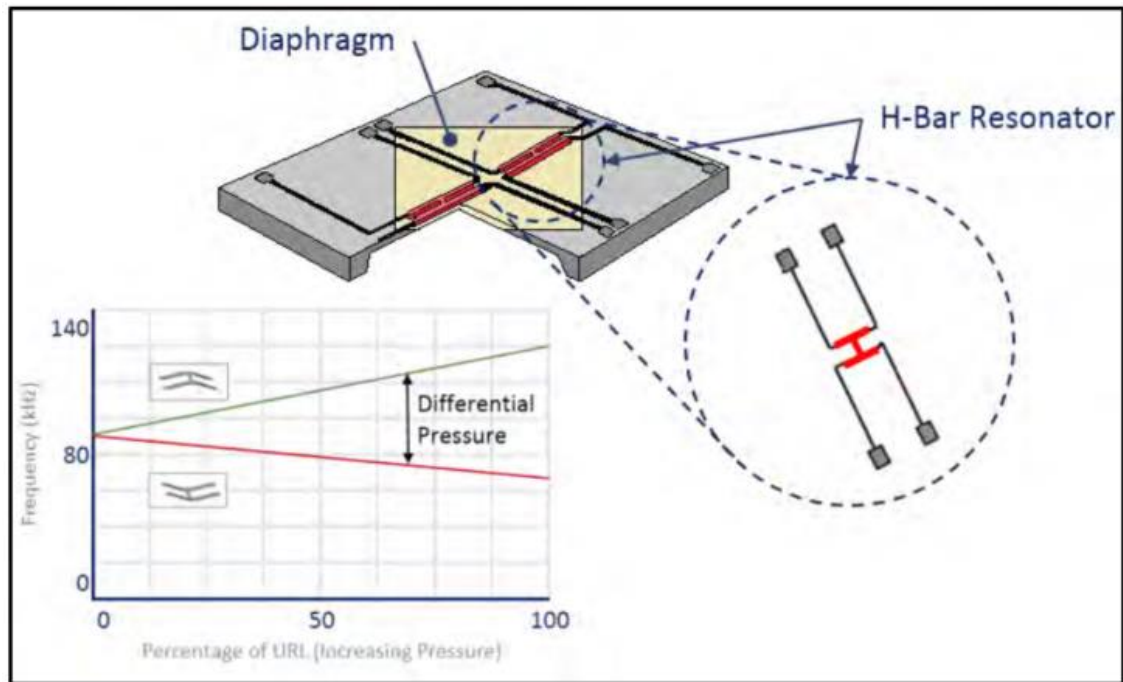


Figura 4. Sensor de presión resonante de silicona. (Hamlett, 2016, pág. 15)

La siguiente tabla muestra las ventajas y desventajas de este tipo de sensores.

Tabla 2

*Ventajas y desventajas sensores de presión resonante de silicona.*

| VENTAJAS  | DESVENTAJAS   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Salida repetible muy estable (eliminando histéresis)</li> <li>• Salida altamente precisa</li> <li>• Señal digital total</li> <li>• Efecto de muy baja temperatura.</li> <li>• Alta relación señal / ruido</li> <li>• Sensor de temperatura incorporado en el sensor</li> <li>• Predecible</li> <li>• Es un sensor activo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente caro de fabricar</li> <li>• no se puede usar en el lado "caliente" de las centrales nucleares</li> </ul> |

*Fuente: Elaboración propia tomado de (Hamlett, 2016).*

#### **4.1.4. Transmisores de presión.**

Los transductores de presión son una forma avanzada de elemento sensor de presión. La forma más simple de un sistema de medición de presión eléctrica es el sensor de presión. Es el sensor de presión el que cambia la variable física "presión" en una cantidad que puede procesarse eléctricamente. Un transductor de presión es el siguiente nivel de sofisticación. En un transductor de presión, el elemento sensor y la carcasa están en contacto eléctrico y tienen una conexión de presión. (WIKA Instrument Corporation, 2008)

Los transmisores de presión son un subgrupo de los transductores de presión, sin embargo, en la actualidad de podría decir que son la versión mejorada y con mayores prestaciones que un simple transductor de presión, más aún cuando se habla de transmisores de presión inteligentes, sin embargo, los transductores tienen gran relevancia para la concepción de los transmisores de presión inteligentes o no.



*Figura 5. Algunos transductores de presión. (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 107)*

Las señales de salida típicas de los transductores de presión están entre 10 mV y alrededor de 100 mV, según el tipo de sensor. Estas señales no están estandarizadas, sin embargo, ni están compensadas. Con los transductores de presión del tipo de película delgada, es habitual que solo el elemento sensor se suelde a la conexión de presión y luego se conecte eléctricamente. (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 107).

#### **4.2. Instrumentos de presión en la industria**

Los instrumentos de presión son por mucho los sensores más usados en la industria, su capacidad de ser usados para medir indirectamente variables como el flujo, nivel, masa, densidad, entre otros, los convierten en un elemento primordial en cualquier proceso, este argumento está apoyado por múltiples autores enfocados en el área de la instrumentación y control entre ellos se cita a: “Los transmisores de presión son ampliamente utilizados en los procesos y aplicaciones con innumerables funcionalidades y recursos.” (Cassiolato, 2008) ...”la gran mayoría de los procesos industriales involucra mediciones de presión, recordando, que presión es una magnitud básica para la medición y control de caudal, nivel y densidad, etc.” (Cassiolato, 2008).

Dicho de otra manera, el uso de los instrumentos de presión en la industria es de gran alcance, desde simples variables de monitoreo hasta variables de control críticas utilizadas en procesos automáticos de lazo cerrado enfocados a garantizar la calidad y seguridad de los diferentes procesos.

##### **4.2.1. Importancia de la calibración y verificación de instrumentos como transmisores de presión.**

Como se dejó claro en el anterior apartado, los transmisores de presión están en gran parte de los procesos industriales, la calidad y correcto funcionamiento de muchos de estos procesos dependen de la correcta medición realizada por el transmisor de presión, el contar con planes de aseguramiento metrológico que garanticen la trazabilidad de las medidas, con

un plan de mantenimiento preventivo idóneo para cada instrumento bajo estándares y buenas prácticas, asegura que los procesos se realicen con calidad asegurando la productividad de los mismos.

En el libro de (WIKA Instrument Corporation, 2008), se hace gran énfasis a la importancia de calibrar regularmente los instrumentos, se afirma que la presión es una de las variables de medidas más importantes en los procesos de producción industrial, la calidad del producto, la seguridad operativa y la economía están casi siempre vinculadas directamente con el registro preciso y confiable de estas variables de proceso y la presión es una de ellas. Adicionalmente se deja claro que las condiciones de trabajo resistentes, como el estrés mecánico continuo y extremo a través de golpes y vibraciones, las altas temperaturas influyen en la precisión y confiabilidad de los instrumentos de medición de presión. Después de solo uno o dos años de servicio, la confiabilidad de dicha medición entra en duda, razón válida para realizar los siguientes cuestionamientos:

“¿Han cambiado las características del instrumento? ¿Son las lecturas dadas iguales a los valores medidos? ¿La precisión del instrumento todavía se encuentra dentro de los límites de error especificados?.” (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 256).

A estas preguntas se da de manera instantánea la respuesta, “Sólo una calibración regular puede garantizar la certeza respecto a esto” (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 256)

La importancia de calibrar, ajustar y verificar instrumentos que hacen parte de procesos industriales como lo son los transmisores de presión es referida por muchos autores, uno de ellos (Creus Solé, 2010) indica: “La confianza, en la bondad y en las indicaciones de los instrumentos de indicación y control, depende de la gestión de calibraciones y es vital para la producción de calidad de una planta.” (Creus Solé, 2010, pág. 638)

En la actualidad el hecho de tener los instrumentos de medición de los procesos bajo un plan de aseguramiento metrológico va más allá de las buenas prácticas o las recomendaciones dadas por un autor, en la actual era de crecimiento y competencia empresarial, las certificaciones con las que puedan contar dichas empresas dice mucho de las mismas y es un punto de análisis importante al elegir entre una opción u otra, entre dichas certificaciones, la certificación de calidad NTC-ISO 9001-2015(cuarta actualización), actualmente es prácticamente requisito obligatorio para poder participar en procesos de contratación con grandes empresas a nivel nacional e internacional, en (ICONTEC, 2015) se contempla de manera clara la trazabilidad de las mediciones e indica que “cuando la trazabilidad de las mediciones es un requisito, o es considerada por la organización como parte esencial para proporcionar confianza en la validez de los resultados de la medición, el equipo de medición debe” (ICONTEC, 2015, pág. 8), a continuación se indica según (ICONTEC, 2015, pág. 8) lo que debe se debe hacer con un equipo de medición que cumpla con lo indicado en la cita anterior :

- Calibrarse o verificarse, o ambas, a intervalos especificados, o antes de su utilización, contra patrones de medición trazables a patrones de medición internacionales o nacionales; cuando no existan tales patrones, debe conservarse como información documentada la base utilizada para la calibración o la verificación;
- Identificarse para determinar su estado;
- Protegerse contra ajustes, daño o deterioro que pudieran invalidar el estado de calibración y los posteriores resultados de la medición. (ICONTEC, 2015, pág. 8)

En un artículo más reciente publicado en el blog de instrumentación de Instrumentos WIKA S.A., se afirma que:

Los sistemas de garantía de calidad y de eficiencia de las plantas están dando mayor importancia a la comprobación de los instrumentos de medida. Un mal necesario que interrumpe los procesos y provoca costes adicionales: a partir de esta opinión

ampliamente difundida, la calibración se contempla a menudo como una tarea secundaria dentro de lo que es la operación de las plantas; como algo que se hace — por así decirlo— de pasada. sin embargo, estas actitudes están cambiando; ante el trasfondo de las exigencias de los sistemas de garantía de calidad, la nueva guía editada por el organismo de acreditación alemán DAkkS y el esfuerzo constante por acercar más y más la eficiencia de las plantas al límite, la calibración se percibe desde una perspectiva cada vez más distinta. (Vega, 2017)

En el mismo artículo se enfatiza la importancia de las calibraciones periódicas de los instrumentos como los son los transmisores de presión, desde su punto de vista las calibraciones periódicas brindan los datos y la información necesaria para conocer y asegurar las características metrológicas de un instrumento de medida, esto permite confirmar y estar seguros del valor medido así como señalar y registrar el tiempo de variación de dicho instrumento, esto permite mejorar la rentabilidad de los procesos productivos dando pie a la optimización de los mismos, adicionalmente el aporte a las seguridad tiene gran impacto, frente a esto cito textualmente a (Vega, 2017): “De esta manera, dichas inspecciones garantizan la supervisión metrológica y el sistema de control de una planta; representan un factor decisivo en lo que se refiere a la seguridad —tanto personal como de los equipos.” (Vega, 2017).

Fluke uno de los fabricantes líder de equipos de calibración denota la importancia de los dispositivos de presión como lo son los transmisores de presión en la industria y la necesidad de asegurar el correcto funcionamiento de los mismos:

Los dispositivos de presión proporcionan la información crítica sobre la medición del proceso a los sistemas de control de procesos de la planta. Por lo general, el rendimiento de los instrumentos de presión de proceso es fundamental para optimizar la operación de la planta o el correcto funcionamiento de sus sistemas de seguridad. Estos tipos de instrumentos a menudo se instalan en entornos operativos agresivos



que producen el cambio gradual de su funcionamiento. Para que estos dispositivos sigan operando dentro de los límites esperados se requiere de verificación, mantenimiento y calibración periódicos. (FLUKE CORPORATION, 2016, pág. 2)

En resumen, a este apartado referente a la importancia de la calibración, ajuste y verificación de los instrumentos de medición industrial en este caso en específico los transmisores de presión, se puede afirmar que la importancia de realizar esta acción va directamente relacionada a la mejora de la calidad, productividad, optimización y seguridad de los procesos, haciendo hincapié en que al mejorar la seguridad de los procesos se salvaguarda la vida de las personas, y frente a esta premisa las demás razones son solo un plus en la importancia de la verificación de los instrumentos.

#### **4.2.2. Conceptos relevantes al momento de calibrar, ajustar y verificar instrumentos como transmisores de presión.**

Antes de indicar el proceso de verificación calibración o ajuste específico de los transmisores de presión, es importante tener claridad sobre ciertos conceptos asociados a dicha actividad, muchos de estos conceptos son propios del lenguaje de metrología, por tal razón no siempre son del dominio común.

- **Calibración:** Según el Vocabulario internacional de metrología (CEM, 2012, pág. 37) define la calibración como:

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Adicionalmente (CEM, 2012, pág. 38) señala que:

Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de

calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente. Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “auto calibración”, ni con una verificación de la calibración.

Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Es importante resaltar que la definición de calibración crea bastante controversia y discusión en el ámbito de la instrumentación industrial y como tal en la actividad de verificar calibrar y ajustar instrumentos, autores como (Creus Solé, 2010) han definido la calibración como como “ajuste de la salida de un instrumento a valores deseados dentro de una tolerancia especificada para valores particulares de la señal de entrada.” (Creus Solé, 2010, pág. 755).

La afirmación anterior es un claro ejemplo de la nota 2 dada por el VIM, en donde se confunde la calibración con el ajuste de un sistema de medida, es decir es una afirmación incorrecta desde el punto de vista del VIM, no obstante esta definición ha sido muy difundida en el área de la instrumentación industrial, actualmente no es raro encontrar personas que compartan esta definición, sin embargo con la acogida cada vez mayor de la metrología en la industria, del aseguramiento metrológico de los instrumentos de medición, de la trazabilidad de las medidas y la calidad de los procesos, este término es cada vez más desvirtuado y de menos uso. En contraste a (Creus Solé, 2010), hay autores como (WIKA Instrument Corporation, 2008) que pretenden dar conceptos y definiciones más en acuerdo a la norma o VIM: “...significa determinar las desviaciones en la medición de un instrumento de medición determinado. no se realiza ningún trabajo mecánico en el instrumento durante la calibración” (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 256), sin embargo, esta definición no abarca completamente la definición dada por el VIM, teniendo en cuenta esto siempre es recomendable utilizar e implementar las definiciones dadas por el VIM, teniendo en cuenta

que el mismo hace parte de una serie de normas internacionales de amplia aplicación en la industria.

- **Ajuste de un sistema de medida:** “Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir” (CEM, 2012, pág. 45).
- **Verificación:** esta debe entenderse como la “aportación de evidencia objetiva de que un elemento dado satisface los requisitos especificados” (CEM, 2012, pág. 39).

#### **4.2.3. Proceso de calibración verificación y ajuste de transmisores de presión.**

Existe literatura extensa respecto a estas actividades, partiendo desde gran número de normas técnicas nacionales de diferentes países, procedimientos propios de distintos autores, procedimientos propios e internos de cada compañía o laboratorio y hasta los mismos fabricantes de los equipos dan sus propios procedimientos, en este aparatado se darán algunos ejemplos de ellos, no obstante, es importante que no se pierda de vista el sentido básico de los conceptos como calibración, verificación y ajuste previamente descritos, sin importar el procedimiento el objetivo entre uno y otro debe ser el mismo.

WIKA fabricante de instrumentos de medición de presión en su libro (WIKA Instrument Corporation, 2008), presenta ciertas indicaciones importantes para la calibración de instrumentos de presión a continuación se aprecian dichas recomendaciones o pautas:

Al calibrar los instrumentos de medición de presión, los patrones y los instrumentos a calibrar están sujetos a la misma presión. La calibración se realiza comparando las lecturas proporcionadas el instrumento en calibración y el patrón. El patrón también puede ser un patrón primario, por ejemplo, un comprobador de peso muerto o un patrón secundario deducido de un patrón primario. La diferenciación se realiza entre dos métodos de

calibración: Calibración según la lectura del instrumento en calibración; calibración según la lectura del patrón. (WIKA Instrument Corporation, 2008, págs. 258-259)

Como regla general, la calibración de acuerdo con la lectura del instrumento en calibración se usa para todos los indicadores de dial es decir manómetros. En este caso, la presión se ajusta de manera que el indicador con la marca en el dial de la muestra se correlacione lo más cerca posible del punto de medición requerido. Como resultado, se excluye un error por interpolación al leer el mensurando en el instrumento en calibración. El verdadero valor de la varianza medida se lee en el patrón. Esto está sujeto a la selección de los puntos de medición para que sea posible que el puntero cubra una marca en el dial. Como regla general, la calibración de acuerdo con la lectura del patrón se aplica a los transductores de medición de presión o a los manómetros con pantalla digital. La presión se ajusta de modo que la lectura del patrón corresponda con el valor de presión requerido. (WIKA Instrument Corporation, 2008, págs. 258-259)

Creus (2010) entrega en su libro una pauta importante respecto a los patrones de calibración: “Los aparatos patrones deben tener una exactitud cuatro veces superior, como mínimo, a la de los instrumentos que van a calibrarse” (Creus Solé, 2010, pág. 647.) Aunque esta recomendación varía mucho de acuerdo a los autores, fabricantes y normas en cuestión, siempre es importante saber que el patrón debe ser de mejor clase de exactitud que la del instrumento en calibración, es importante no solo tener en cuenta la clase de exactitud sino también la incertidumbre reportada en el último certificado de calibración del mismo.

#### **4.2.3.1. Equipos utilizados en la calibración de instrumentos de presión.**

En el anterior apartado quedo claro que la calibración de los instrumentos de presión consiste en comparar el instrumento en calibración con un patrón de referencia que bien puede ser primario o secundario sujetos ambos a una misma presión.

Los probadores de peso muerto se utilizan como un patrón de referencia primario para las mediciones de presión. Los comprobadores de peso muerto internos de WIKA presenta patrones de referencia de WIKA para calibraciones de presión de 5 "H<sub>2</sub>O a 150,000 PSI. Estos comprobadores de peso muerto se utilizan para calibrar patrones de trabajo, por ejemplo, medidores de precisión de peso muerto, sensores de tubos de cuarzo Bourdon, transductores de presión eléctricos y medidores de precisión. (WIKA Instrument Corporation, 2008, págs. 259-260)



*Figura 6. Calibración de un manómetro usando un peso muerto. (WIKA, 2008, pág. 259).*

A continuación, se presenta la definición del peso muerto dada por (Creus Solé, 2010, pág. 648):

El peso muerto consiste en una bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego

de pesas. La comprobación se lleva a cabo accionando la bomba hasta levantar el pistón que soporta las pesas calibradas. Con la mano se hace girar este pistón. Su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas está flotando sin roces.

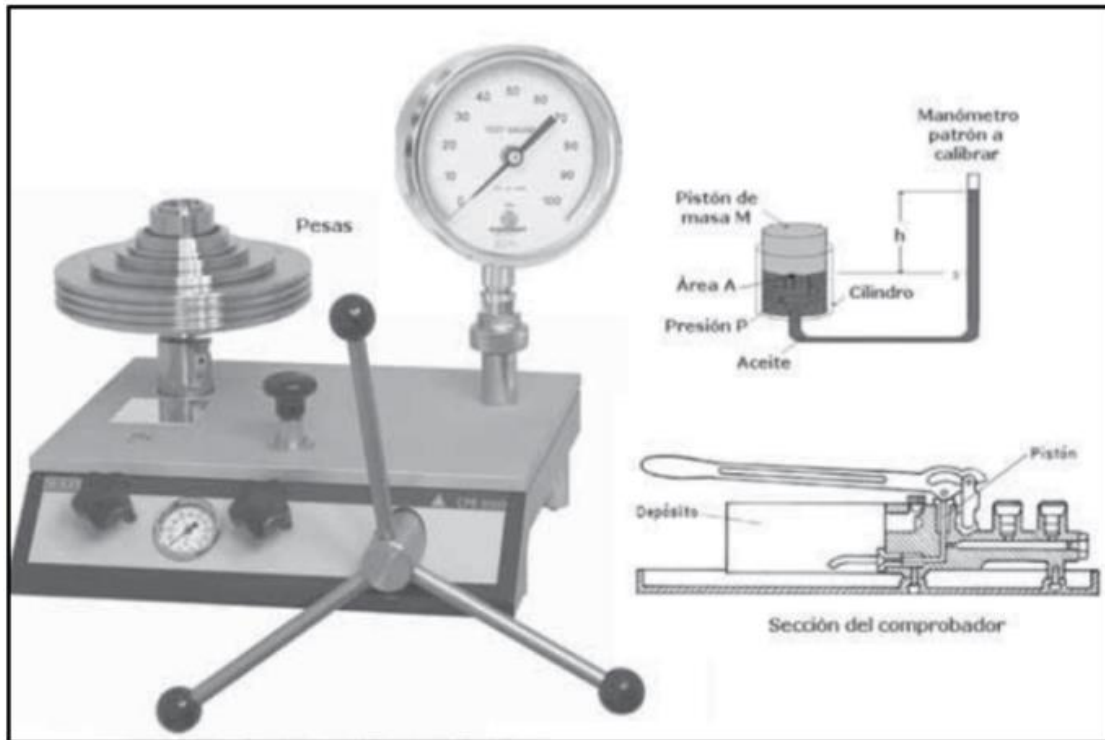


Figura 7. Peso muerto. (Creus, 2010, pág. 648).

WIKA presenta según ellos un sistema de calibración portátil, que básicamente consiste en una bomba manual hidráulica o neumática que puede ir desde presiones de vacío hasta 15000 PSIG y un transductor de presión como patrón secundario de calibración, es importante resaltar que estos patrones por ser de campo entran dentro de la definición de patrones de trabajo. A continuación, la descripción dada por WIKA para dicho sistema:

Un sistema de calibración portátil, por ejemplo, el sistema PCS de WIKA, está formado por una bomba manual neumática o hidráulica con la cual se pueden generar presiones de prueba desde tan solo unas pulgadas de H<sub>2</sub>O a 15,000 psi. Aquí se utilizan transductores de presión eléctrica como el patrón. Estos se han calibrado previamente junto con una unidad digital de medición manual, por ejemplo, el manómetro de servicio portátil

WIKA, a un patrón de clasificación más alto. Para propósitos de calibración, el patrón y el instrumento en calibración se enroscan en un adaptador apropiado y se ponen bajo presión por la bomba de prueba. El ajuste de precisión se realiza mediante un tornillo de ajuste en la bomba con el cual la presión en el manómetro bajo prueba se puede ajustar con precisión variando el volumen de la presión de prueba. La presión real se lee en la pantalla digital del patrón con una incertidumbre de 0.25% basada en el límite superior del rango efectivo del patrón. (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 261).



*Figura 8. Sistema de calibración portátil WIKA PCS-H 1000. (WIKA Instrument Corporation, 2008, pág. 261).*



*Figura 9. Calibrador portátil descrito por Creus. (Creus, 2010, pág. 649)*

### **4.3. El control**

#### **4.3.1. Sistemas de control.**

En la actualidad hablar de control y saber que no está en todos lados es complicado, el control en la vida diaria se ha vuelto algo normal en ella, los autores (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 2) opinan sobre el control en la actualidad así:

Los controles automáticos tienen una intervención cada vez más importante en la vida diaria, desde los simples controles que hacen funcionar un tostador automático hasta los complicados sistemas de control necesarios en vehículos espaciales, en guiado de proyectiles, sistemas de pilotajes de aviones, etc. Además, el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos, maquinado manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación, entre muchas otras (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 2).

Planteándose de esta manera la importancia del control no solo a nivel académico o de a un alto nivel de diseño a continuación se describen algunos de los términos más relevantes sobre el control:

##### **4.3.1.1. *Sistema de control de lazo abierto.***

“En un sistema de control de lazo abierto la salida ni se mide ni se realimenta para compararla con la entrada.” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 10). “Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la señal o acción de control” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 10).





Figura 10. sistema de lazo abierto. (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 10).

Según (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008) un sistema de control en lazo abierto está dividido en dos partes una conformada por el controlador quien genera una señal de control y la segunda parte conformada por el proceso controlado el cual es regulado por la señal actuante o señal de control del controlador. Adicionalmente se cita algunos casos simples y otros complejos en donde el controlador puede estar representado por “un amplificador, filtro, unión mecánica u otro elemento de control. En los casos más complejos puede ser una computadora tal como un microprocesador.” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 10)

#### 4.3.1.2. Sistema de control de lazo cerrado.

“Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control. Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentados.” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 11).

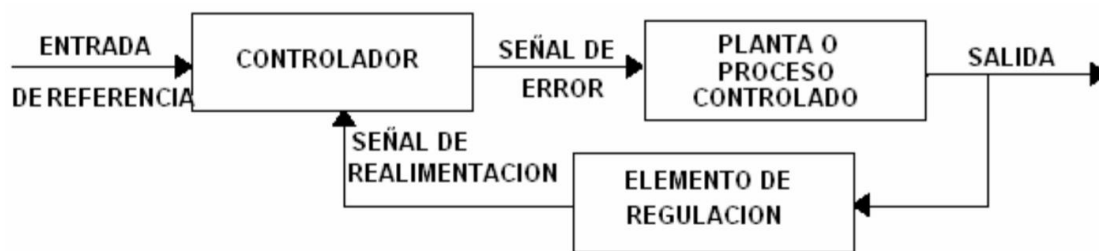


Figura 11. Diagrama de un sistema retroalimentado. (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 11)

En un sistema de lazo cerrado se realiza la resta o comparación de la señal de entrada con la señal de salida, al resultado de esta comparación se le conoce como señal error y es la que finalmente actúa sobre el proceso controlado (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer,

2008, pág. 11), o en otras palabras “el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación negativa para reducir el error del sistema” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 11).

#### 4.3.1.3. *Comparación sistemas de control lineales con no lineales.*

Se parte diciendo que los sistemas lineales no existen en la realidad, esto lo dejan claro los autores (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 18). Al indicar que los sistemas físicos en algún punto dejan de ser lineales es decir no son lineales, sin embargo, afirman que una práctica que facilita el diseño de sistemas de control, es idealizar sistemas físicos reales como sistemas lineales, esto a través de modelos matemáticos analíticos fabricados con base a dichos sistemas reales, una vez diseñado el controlador para un modelo del sistema idealizado lineal, se aplica el controlador al sistema real no lineal, se evalúa y se rediseña el controlador.

- **Sistema Lineal:** “Físicamente hablando, analizando la respuesta de un sistema, un sistema es lineal si la salida sigue fielmente los cambios producidos en la entrada.” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 19). Según (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 19) en un sistema lineal se deben cumplir las dos siguientes propiedades:
  - a) si las entradas son multiplicadas por una constante, las salidas también son multiplicadas por la misma constante.
  - b) Los sistemas lineales se caracterizan por el hecho de que se puede aplicar el principio de superposición. (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 19).
- **Sistemas no lineales:** “Los sistemas no lineales son todos los demás, regidos por ecuaciones no lineales, por ejemplo, ecuaciones diferenciales con coeficientes que son función de la variable dependiente, ecuaciones diferenciales parciales, multiplicación entre variables, o cualquier otro tipo de ecuación funcional.” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 21).

#### **4.3.1.4. Comparación sistemas invariantes con el tiempo con sistemas variantes con el tiempo.**

Antes de abordar el por qué un sistema es invariante o no en el tiempo es pertinente aclarar que es una variable y que es un parámetro:

- “Las variables, como su nombre lo indica son magnitudes cambiantes en el tiempo, las cuales determinan el estado de un componente, bloque o sistema. (Por Ejemplo: tensión, intensidad de corriente, velocidad, temperatura, nivel etc).” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 22).
- “Los parámetros son magnitudes que pueden permanecer constantes o variar según sea el sistema. Los mismos reflejan las propiedades o características inherentes de los componentes (Ejemplo: masa, inductancia, capacitancia, resistencia, conductividad, constante de elasticidad, coeficiente volumétrico de flujo, etc).” (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 22).

Una vez aclarados estos términos es posible entender la definición dada por los autores (Perez, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008, pág. 22) a lo que es un sistema invariante en el tiempo, dicho sistema es aquel en donde sus parámetros o magnitudes permaneces sin cambios al paso del tiempo, sin embargo en la práctica todo sistema físico varia sus parámetros con el tiempo, en contraposición cuando dichos parámetros varían con el tiempo se considera un sistema variante en el tiempo, la principal diferencia entre los dos es que pese a que ambos sistemas sean idealmente lineales, un sistema variante en el tiempo presenta un nivel de complejidad alto el cual se ve reflejado en la necesidad de un análisis y diseño igualmente complejo.

#### **4.3.2. Tipos de control.**

El autor (Creus Solé, 2010, pág. 504) en su libro tipifica los tipos de control existentes como sigue continuación:

En los sistemas industriales se emplea, básicamente, uno o una combinación de los siguientes sistemas de control:

- De dos posiciones (todo-nada).
- Flotante.
- Proporcional de tiempo variable.
- Proporcional.
- Proporcional + integral.
- Proporcional + derivada.
- Proporcional + integral + derivada.

En las secciones siguientes se realiza una breve descripción de cada uno de los tipos de control listados.

#### **4.3.2.1. Control todo-nada.**

El control todo a nada según (Creus Solé, 2010, pág. 504) se describe como:

En la regulación *todo-nada*, la válvula de control adopta únicamente dos posiciones, abierta o cerrada, para un valor único de la variable controlada. Este tipo de control se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

El control todo-nada se emplea, usualmente, con una banda diferencial o zona neutral, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior, respectivamente, a las necesidades de la operación normal.

La principal característica de este método de control es la oscilación constante del punto de control en consigna, en procesos donde la exactitud respecto al punto de control no es

muy exigente es un método funcional y económico, un ejemplo de este método de control son los aires acondicionados llamados actualmente tipo convencionales en donde el control automático se realiza por medio de la implementación del tipo de control todo o nada, si la temperatura real se encuentra por encima de la temperatura deseada el compresor y el aire están prendidos al 100% una vez se alcanza la temperatura deseada el compresor se apaga.

#### **4.3.2.2. Control flotante.**

Descrito por (Creus Solé, 2010, pág. 506) como:

Denominado control flotante de velocidad constante mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, una regulación todo-nada puede convertirse en una regulación flotante si se utiliza una válvula motorizada reversible de baja velocidad (con un tiempo de recorrido de 1 minuto, o más, desde la posición abierta a la cerrada o viceversa).

El control flotante, análogamente al control todo-nada, tiende a producir oscilaciones en la variable controlada, pero estas oscilaciones pueden hacerse mínimas eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final para que compense las características del proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable ante los cambios más rápidos de carga que puedan producirse en el proceso.

En resumen, es una mejora del control todo o nada donde la oscilación del punto de control deseado se hace más pequeña reduciendo el rango de operación del control todo o nada.

#### **4.3.2.3. Control proporcional de tiempo variable.**

Este sistema contempla su utilización en un sistema de control final de dos posiciones similar al utilizado en los dos tipos de control anteriores, sin embargo, el tiempo de activación y desactivación varía proporcionalmente a lo lejos o cerca que se esté del punto de

consigna a controlar (Creus Solé, 2010), en la siguiente figura se aprecia un claro ejemplo de este tipo de control:

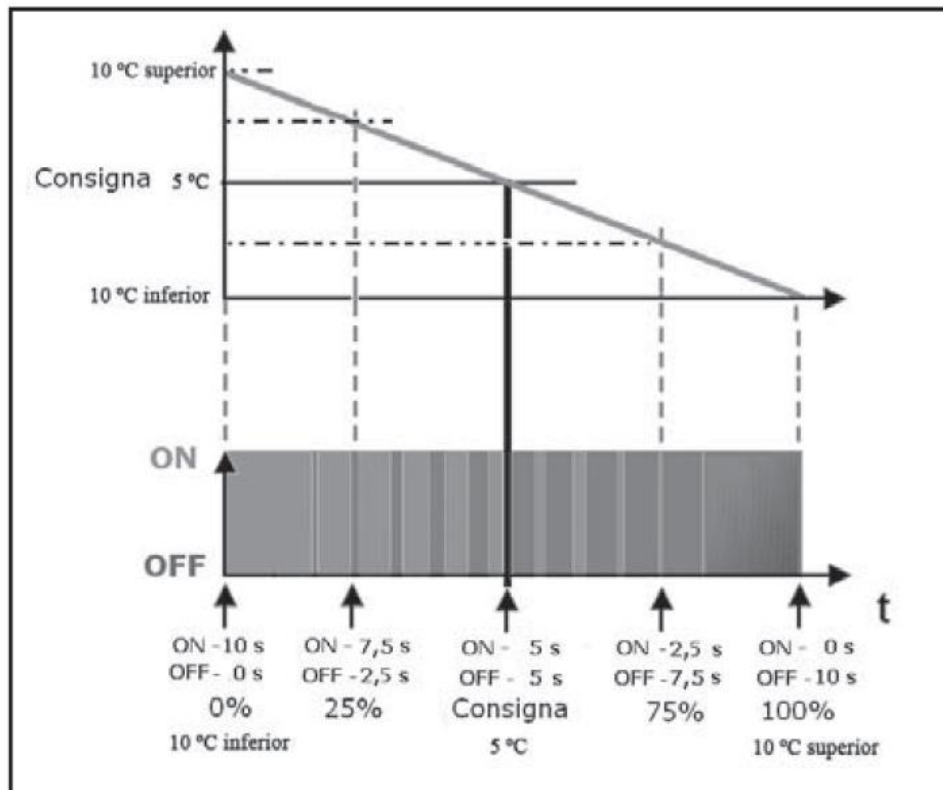


Figura 12. Control proporcional de tiempo variable. (Creus Solé, 2010, pág. 507).

El ejemplo del controlador de la gráfica se describe como:

Tiene un ciclo completo de 10 segundos y un margen de actuación de 20 °C. En el punto de consigna de 10 °C el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo desconecta 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10 °C, el elemento final está siempre conectado, mientras que si aumenta 10 °C está desconectado. A 5 °C por encima del punto de consigna, el elemento final está conectado sólo 2,5 segundos, desconecta durante 7,5 segundos, y así sucesivamente. (Creus Solé, 2010, pág. 507).

#### 4.3.2.4. Control proporcional.

“En el sistema de posición proporcional existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación” (Creus Solé, 2010, pág. 507).

Una de las principales características de este tipo de control es que presenta una desviación permanente del punto de control de consigna una vez estabiliza, esto se denomina como OFFSET (Creus Solé, 2010, pág. 507) y será uno de los inconvenientes a corregir por los tipos de control explicados más adelante.

#### **4.3.2.5. Control proporcional + integral.**

Pensado para sistemas en donde el control proporcional por sí solo no es suficiente y que se requiere que la variable controlada este lo más cerca posible al set-point de consigna de control se caracteriza “por el llamado tiempo de acción integral en minutos por repetición (o su inversa repeticiones por minuto) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional” (Creus Solé, 2010, pág. 511).

Este control como el anterior presenta una particularidad que lo distingue de los demás tipos de control, (Creus Solé, 2010, pág. 512), lo llama “rebasamiento del punto de consigna”, este fenómeno “se presenta porque la unidad integradora empieza a actuar cuando la temperatura llega al límite inferior de la banda proporcional, y continúa actuando mientras la temperatura no alcance el punto de consigna” (Creus Solé, 2010, pág. 512) .

#### **4.3.2.6. Control proporcional + derivado.**

“En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control” (Creus Solé, 2010, pág. 512). Es decir, “el control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es proporcional a la pendiente de la variable, es decir, a su derivada” (Creus Solé, 2010, pág. 512).

“La acción derivada se caracteriza por el llamado tiempo de acción derivada en minutos de anticipo” (Creus Solé, 2010, pág. 512), que no es otra cosa que el “intervalo durante el cual, la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción

proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa cuando se aplica una señal en rampa” (Creus Solé, 2010, pág. 512).

La implementación de este tipo de control puede ayudar a aumentar el tiempo de respuesta del elemento final de control volviéndolo más sensible ante las perturbaciones al anticiparse al cambio, sin embargo al depender directamente de los cambios en la variable controlada, es decir, sino hay cambio no hay anticipo, al dejarse tiempos de deriva muy grandes se pueden ocasionar grandes oscilaciones en la variable de control (Creus Solé, 2010, pág. 514).

#### 4.3.2.7. *Control proporcional + integral + derivado.*

Mas conocido como el controlador PID, como su nombre lo indica es la integración de los tres controles previamente vistos, cuyo objetivo es lograr un control más rápido y eficiente en procesos que así lo ameriten (Creus Solé, 2010, pág. 514).

En la siguiente figura observamos el comportamiento del control PID en comparación a los controles previamente vistos:

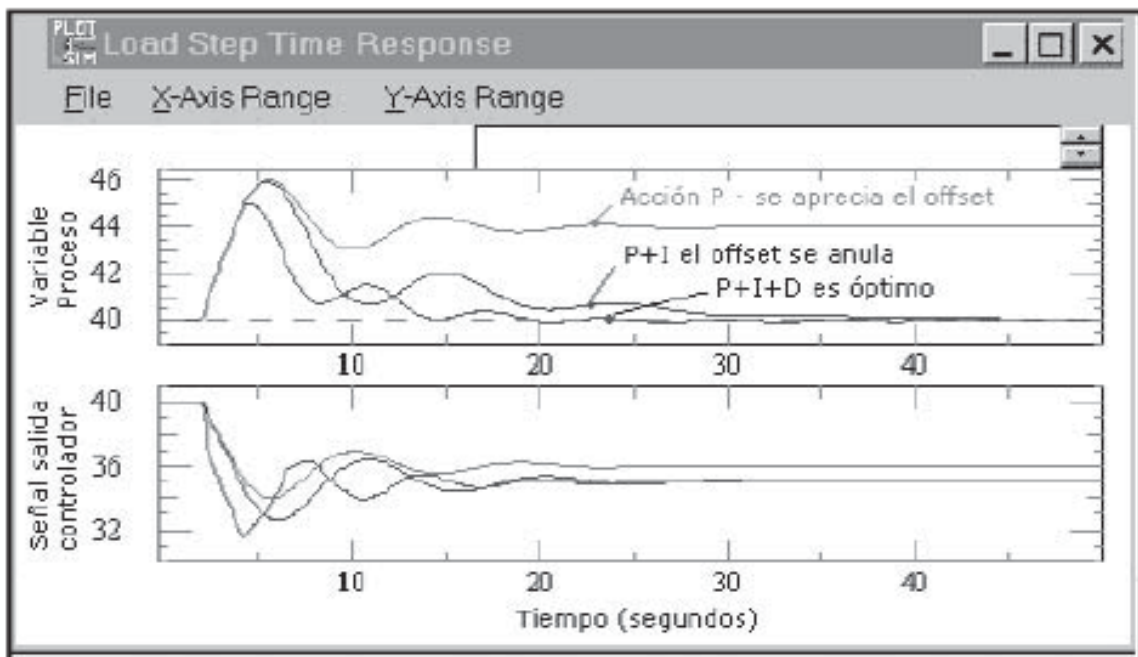


Figura 13. Control PID comparación. (Creus Solé, 2010, pág. 515)



A continuación (Creus Solé, 2010, págs. 514-515) realiza una descripción del comportamiento de cada uno de los componentes del control PID;

- La acción *proporcional* cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal *P* (proporcional) mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la *ganancia*. Un aumento de la ganancia conduce a una mayor acción proporcional y un control más rápido.
- La acción *integral* mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna. La señal *I* (integral) va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna, repitiendo la señal proporcional según su *i* (*minutos/repetición*). Una disminución del tiempo de acción integral proporciona una mayor acción integral y un control más rápido.
- La acción *derivada* corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal *D* (derivada) es la pendiente (tangente) de la curva descrita por la variable, con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debida a la acción proporcional según el valor de *d* (*minutos de anticipo*). Un aumento del tiempo de acción derivada incrementa la acción derivada y proporciona un control más rápido.

Es evidente que factores como la ganancia, los tiempos de deriva e integración definieran el comportamiento de nuestro sistema controlado, sin embargo, no siempre el menor tiempo y la mayor ganancia son certeza de un control rápido y eficiente.

#### **4.4. Sistemas de control avanzado**

Las técnicas hasta ahora vistas para realizar control en ocasiones cuando los procesos no son tan lineales y muchas veces más complejos, estas técnicas se quedan cortas, la presencia de retardos y perturbaciones muy marcadas convierten a un proceso sencillo en un proceso complejo, en estos casos específicos muchas de las veces los controles PID se quedan cortos o su implementación presenta un gran nivel de dificultad, para estos casos específicas se ha

desarrollado los sistemas de control avanzados esto gracias a integración de los microprocesadores y los ordenadores a los sistemas de control (Creus Solé, 2010, pág. 590), a continuación se listan diversos sistemas de control avanzados identificados por el autor (Creus Solé, 2010, pág. 591):

- Correctores de retardo del proceso, útiles en el caso de intercambiadores de gran capacidad.
- Control robusto, que es la tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso.
- Control linealizado global.
- Control estadístico que trabaja entiempos real con las leyes de probabilidad de las variables y que, gracias a los cálculos de la media, la desviación estándar y otros valores, determina la tendencia de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a cambios en la calidad de los productos fabricados.
- Control multivariable en el que se compensa la influencia mutua de diversas entradas y salidas del proceso.
- Control óptimo en el que el sistema cumple una ley de control tal, que la salida del controlador hace mínima la función objetivo (por ejemplo, conseguir una rápida aproximación al punto de consigna y un mínimo rebasamiento de la variable manipulada).
- Control adaptativo en el que el sistema de control ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso.
- Control predictivo que, mediante modelos dinámicos del proceso, se anticipa y prevé las situaciones futuras del proceso en base al conocimiento de los datos pasados y los actuales.
- Sistemas expertos que, mediante una base de conocimientos, se integran en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.

- Control por redes neuronales, que es una forma de control que imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso.
- Control por lógica difusa, que utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas, haciendo más humano el control y siendo adecuado para el control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo.

La implementación de una o varias de estas metodologías resuelve en muchos de los casos las limitaciones o dificultades presentada con la implementación de controladoras PID.

#### **4.4.1.1. Lógica difusa.**

“La lógica difusa es una rama de la IA que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero... concepto clave: todo es cuestión de grado.” (Ponce Cruz, 2010, pág. 3).

El autor (Ponce Cruz, 2010), define la lógica difusa como la creación de un sistema experto en donde para llegar a una solución se tiene múltiples razonamientos difusos, con difuso se refiere a que no son precisos en cuanto a los datos que manejan un sistema preciso a manera de ejemplo son las computadoras que manejan datos basados en el código binario de 1 y 0 donde los valores son verdaderos o falsos, un sistema difuso es aquel que intenta imitar el razonamiento humano en donde el razonamiento es parcialmente cierto.

La implementación de la lógica difusa, según (Ponce Cruz, 2010, pág. 36) es motivado por el deseo satisfacer uno o más de los siguientes objetivos:

1. Mejorar la robustez que se obtiene con los métodos clásicos de control lineales.
2. Diseño de control simplificado para modelos complejos.
3. También se obtiene una implementación simplificada.
4. Autonomía.
5. Adaptabilidad.
6. En el caso del control difuso, no es necesario un modelo matemático de la planta.

Por otro lado, “La esencia del control difuso es que convierte la estrategia de control lingüístico, la cual se basa en el conocimiento de un experto, en una estrategia de control automático” (Ponce Cruz, 2010, pág. 36).

#### **4.4.2. Válvulas de control.**

“El elemento de control final más habitual en las industrias de control de procesos es la válvula de control” (Emerson Automation Solutions, 2017, pág. 15).

Como (Emerson Automation Solutions, 2017) lo indica la utilización de las válvulas de control en la industria es habitual, esto se debe a que las válvulas de control manipulan los diferentes líquidos que hacen parte de un proceso con ello compensan las perturbaciones del proceso y lo mantienen estable.

Los tipos de válvulas existentes varían de acuerdo al diseño de su cuerpo, a continuación, se presentan algunos de ellos:

- Válvulas de globo: normalmente de vástago deslizante.
- Válvulas de bola: normalmente rotativas.
- Válvulas de mariposa: normalmente rotativas.
- Válvulas de compuerta: normalmente de vástago deslizante.

#### **4.5. Diseño de prototipos**

“Definimos prototipo como “una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés”. Con esta definición, cualquier entidad que exhiba al menos un aspecto del producto que es de interés para el equipo de desarrollo puede considerarse como un prototipo”. (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286).

Ejemplos de la definición de (Ulrich & Eppinger, 2013), son simulaciones, modelos matemáticos, bosquejos de conceptos, versiones de prueba completamente funcionales realizadas para asegurar la confiabilidad de un producto antes de la producción en masa del

mismo, “Construir prototipos es el proceso de desarrollar esa aproximación al producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286).

#### 4.5.1. Tipos de prototipos

Según (Ulrich & Eppinger, 2013) los prototipos se dividen en dos dimensiones, “La primera es el grado al cual el prototipo es físico en oposición a analítico. Los prototipos físicos son objetos tangibles semejantes al producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287), “Los prototipos analíticos representan el producto en una forma no tangible, en general matemática o visual” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287).

“La segunda dimensión es el grado al cual el prototipo es integral en oposición a enfocado. Los prototipos integrales ejecutan la mayor parte de los atributos de un producto (si no es que todos).” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287), “En contraste, los prototipos enfocados realizan uno, o pocos, de los atributos de un producto.” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287).

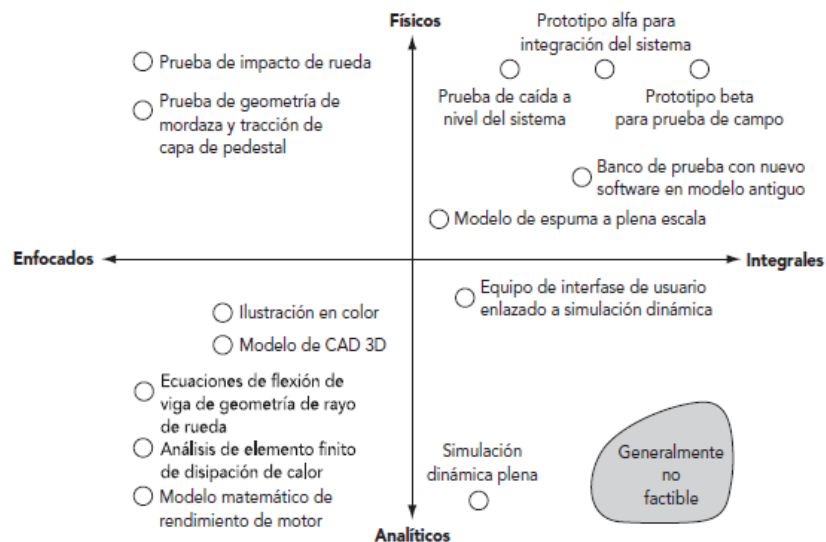


Figura 14. Tipos de prototipos. (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 289).

El análisis presentado permite una identificación y definición clara del tipo de prototipo que se requiere o se puede implementar en distintos proyectos de diseño.

## 5. Metodología

El diseño del prototipo del banco de presión se encuentra dentro de la definición de un proceso investigativo tipo cualitativo, según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) en su libro “Metodología de la Investigación” una investigación de enfoque cuantitativo utilizada para la recolección de datos, para probar una hipótesis con base a la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas y probar teorías, este enfoque se caracteriza por ser secuencial y probatorio, cada etapa precede a la anterior, esto en concordancia con la metodología definida a continuación.

Al definir la metodología usada en este proyecto es necesario definir la esencia de el mismo, para ello es importante resaltar el hecho que el proyecto tiene como finalidad diseñar un prototipo, partiendo de esta afirmación es importante aclarar que es diseño y que es un prototipo, según Ulrich & Eppinger (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 3) diseño es el proceso de definir la forma física de un producto que satisface las necesidades un cliente, dividiéndose en dos aspectos importantes, el diseño de ingeniería (mecánico, eléctrico, software, etc.) y el diseño industrial (estético, ergonómico, interfaces de usuarios), por otro lado Montaña Quintero cita en su trabajo que el diseño de un producto es una actividad creativa la cual busca definir de manera formal las características, funciones y tecnologías de un producto. (Montaña Quintero, 2017, pág. 34). Ahora bien para definir que es un prototipo Ulrich & Eppinger determinan que un prototipo es “una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286), partiendo de esta definición Ulrich & Eppinger clasifican los prototipos en dos dimensiones; físico en oposición a analítico e integral en oposición a enfocado, de esta clasificación resalta la que está más acorde con el proyecto, siendo esta el prototipo físico integral que se puede describir como “Un prototipo integral corresponde cercanamente al uso diario de la palabra prototipo, en que es una versión a plena escala y por completo operacional del producto” (Ulrich &

Eppinger, 2013, pág. 287) como complemento a lo ya dicho se agrega lo dicho por Montaña Quintero al afirmar que el prototipado (echo de diseñar y construir un prototipo) es lo que permite tener de forma virtual y/o física un producto, y el mismo, es un componente transversal e implícito en la mayoría (por no decir que en todos) de los modelos y metodologías enfocadas al diseño y desarrollo de productos (Montaña Quintero, 2017, pág. 70).

En consecuencia a lo expuesto previamente, es claro que la metodología a seguir para la ejecución de este proyecto debe ser una que permita enfocar el desarrollo del mismo a la concepción final de un prototipo, para ello y previa investigación realizada en fuentes tales como (Montaña Quintero, 2017), (Ulrich & Eppinger, 2013), (Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 2008) y (McConnell, 1996), se definió que una sola metodología de las estudiadas e investigadas no cumple en su totalidad con el objetivo de este proyecto por tal razón y siguiendo el ejemplo de McConnell en donde presenta la posibilidad de combinar modelos con otros dejando ver que la metodología de spiral puede ser fácilmente combinada con otras metodologías (McConnell, 1996, pág. 164), se opta por combinar metodologías aterrizándolas a las necesidades de nuestro proyecto teniendo como resultado se plantean las siguientes etapas metodológicas:

- Identificación de las necesidades del cliente.
- Definición de especificaciones.
- Generación de conceptos.
- Selección de concepto.
- Construcción de prototipo.
- Prueba del prototipo.

## 6. Identificación de las necesidades del cliente

Para el desarrollo de esta etapa del proyecto se utiliza como base lo indicado en la norma “ISO/IEC 15288”, “6.4 Technical Processes, 6.4.1 Stakeholder Requirements Definition Process” (Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 2008, pág. 47). El propósito de esta etapa es identificar en primera instancia las partes interesadas en el desarrollo del proyecto, a continuación, los requisitos que dichas partes interesadas tienen en el proyecto y en base a estos definir los requisitos específicos del sistema, en este caso en particular los requisitos del prototipo que satisfagan las necesidades del cliente.

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Especificar las características, los atributos y los requisitos funcionales y de rendimiento requeridos para el prototipo.
- Especificar las restricciones que afectarán el diseño arquitectónico del prototipo y los medios para realizarlo.
- Lograr integridad y la trazabilidad de los requisitos del sistema a los requisitos de las partes interesadas.
- Definir una base para verificar que se cumplen los requisitos del sistema.

Con la ejecución de esta etapa se da inicio al cumplimiento al objetivo específico:

- Identificar los requisitos y especificaciones mínimas que debe cumplir el prototipo del banco de presión.

### 6.1. Actividades y tareas

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan las siguientes actividades y tareas:

#### 6.1.1. Actividad uno: Obtener los requisitos de los interesados.

Esta actividad consta de las siguientes tareas:



1. Identificar las partes interesadas individuales o las clases de partes interesadas que tienen un interés legítimo en el prototipo a diseñar.
2. Obtener los requisitos del prototipo indicados por las partes interesadas previamente identificadas.

### 6.1.2. Desarrollo actividad uno: Obtener los requisitos de los interesados.

#### 6.1.2.1. *Desarrollo tarea uno: Identificar las partes interesadas individuales o las clases de partes interesadas que tienen un interés legítimo en el prototipo a diseñar.*

Para realizar la identificación de las partes interesadas en el desarrollo de este proyecto se parte de que el proyecto nace de la necesidad de satisfacer la necesidad de un cliente, con base a esto es claro que el principal interesado es el cliente y patrocinador de este proyecto.



Figura 15. Identificación partes interesadas. Fuente: El autor.

Como resultado de este análisis se identifica una clase interesada con la cual se identifican dos partes individuales interesadas en el desarrollo del proyecto:

1. Supervisor de manteniendo de la empresa HIDROCASANARE.
2. Técnico de instrumentación y control de la empresa HIDROCASANARE.

**6.1.2.2. *Desarrollo tarea dos: Obtener los requisitos del prototipo indicados por las partes interesadas identificadas previamente.***

Para el desarrollo de esta tarea se determina a groso modo los intereses individuales de cada una de las partes interesadas en el desarrollo del proyecto, logrando con ello identificar y aislar los requisitos que son realmente relevantes para el desarrollo del prototipo en cuestión del cual trata este trabajo, en el siguiente cuadro se pueden apreciar dichos requisitos:

Tabla 3

*Requisitos de las partes interesadas en el desarrollo del proyecto.*

| Parte interesada                     | Requisitos, necesidades, deseos   |
|--------------------------------------|---|
| Supervisor de manteniendo            | Lograr la disminución de horas hombres invertidas en el desarrollo de las actividades de mantenimiento del área de instrumentación y control de la compañía, esto se puede apreciar en el anexo A, “Circular informática interna área de mantenimiento” con fecha del 18 de septiembre del 2018.  |
| Técnico de instrumentación y control | Dar cumplimiento a lo solicitado por el supervisor de mantenimiento en el anexo A, “Circular informática interna área de mantenimiento” con fecha del 18 de septiembre del 2018, a través de la propuesta realizada por medio del “Informe de inspección de hallazgos de falla de equipos de la refinería de HIDROCASANARE”, con fecha del 05 de octubre del 2018 y que se puede apreciar en anexo B. |

Como resultado se identifican claramente las partes interesadas que aportan requisitos específicos y que darán forma al desarrollo del proyecto, el supervisor de mantenimiento y el técnico de instrumentación y control, ambas partes pertenecientes al ente patrocinador del

proyecto, por ende, las actividades siguientes se centran en la identificación de las necesidades y requisitos de dichos individuos.

### **6.1.3. Actividad dos: Definir los requisitos de las partes interesadas.**

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Definir las restricciones en una solución de sistema que son consecuencias inevitables de los acuerdos existentes, decisiones de gestión y decisiones técnicas.
2. Definir un conjunto representativo de secuencias de actividades para identificar todos los servicios requeridos que corresponden a escenarios y entornos operativos y de soporte anticipados.
3. Identificar la interacción entre los usuarios y el sistema.

### **6.1.4. Desarrollo actividad dos: Definir los requisitos de las partes interesadas.**

#### **6.1.4.1. *Desarrollo tarea uno: Definir las restricciones en una solución de sistema que son consecuencias inevitables de los acuerdos existentes, decisiones de gestión y decisiones técnicas.***

Para el desarrollo de esta primera tarea se tiene como insumo el anexo A: “Circular informática interna área de mantenimiento” con fecha del 18 de septiembre del 2018, el anexo B: “Informe de inspección de hallazgos de falla de equipos de la refinería de HIDROCASANARE”, con fecha del 05 de octubre del 2018 y el anexo C: “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN”, en dichos documentos se especifica, por parte del supervisor de mantenimiento y del técnico de instrumentación, requisitos y restricciones así como la propuesta o prototipo objetivo al cual se quiere llegar, siendo este un sistema automatizado del sistema de generación de presión necesaria para verificar los instrumentos de presión de 0 a 100 PSIG de la planta, dichos documentos se emiten siguiendo protocolos definidos por la compañía a través de la validación de decisiones en un protocolo jerárquico establecido internamente, en

donde el supervisor de manteniendo cuenta con un nivel jerárquico que le permite la aprobación y el patrocinio de proyectos de esta índole, así como faculta al técnico de instrumentación a través de la aprobación de su jefe directo para la intervención en dichos proyectos.

Como resultado al análisis de dichos documentos se tiene en primera instancia las restricciones del proyecto:

- Se deben usar, en lo posible, recursos propios ya adquiridos por la compañía y que se encuentren en el almacén.
- La suma total de los materiales usados del almacén y los que se puedan llegar a comprar adicionalmente no pueden superar \$10'000.000, diez millones de pesos colombianos.
- El proyecto debe ser ejecutado con el personal que ya cuenta la empresa en dicha área de mantenimiento.
- El prototipo debe poder operarse por un solo operario.
- La propuesta debe ser de bajo costo para permitir su implementación y justificación en la efectiva disminución de las horas hombre.
- Se debe contar con fuente de alimentación para los transmisores a verificar.
- Se debe contar con conexiones que faciliten el montaje de los equipos a verificar y los patrones de verificación en el taller de tal forma que la altura entre los equipos patrón y los equipos a verificar sea la misma.
- El prototipo debe permitir la verificación en distintos puntos de presión a través del rango de operación de los equipos a verificar tanto ascendente como descendentemente.
- Se debe permitir trabajar con más de una unidad de presión teniendo en cuenta las distintas unidades de presión que manejan los equipos de la planta.

- El prototipo debe brindar estabilidad en los puntos de verificación con el objetivo de poder comparar correctamente la lectura entre el patrón y el equipo en verificación.
- El tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro debe ser menor al tiempo que se requeriría con la bomba neumática manual para realizar esta operación.
- El prototipo se debe realizar con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW.
- El tiempo de trabajo continuo del prototipo no debe retrasar la ejecución normal de la actividad de verificación.

**6.1.4.2. *Desarrollo tarea dos: Definir un conjunto representativo de secuencias de actividades para identificar todos los servicios requeridos que corresponden a escenarios y entornos operativos y de soporte anticipados.***

En el anexo A se especifica que el proyecto va dirigido a satisfacer una necesidad en la optimización de las actividades de verificación y ajuste de instrumentos del área de instrumentación y control de la compañía y con esto en mente, según el conocimiento previamente obtenido en el marco teórico y adicionalmente la experiencia del autor de este trabajo el cual cuenta con más de 8 años de experiencia ejerciendo como técnico de instrumentación y control, se deduce el escenario y el entorno en el cual operaría el prototipo a diseñar, esto permite identificar requisitos que pueden no haber sido formalmente especificados por las partes interesadas.

El prototipo se diseña para satisfacer la necesidad de optimizar la actividad de verificación y ajuste de instrumentos del área de instrumentación y control, esta actividad se lleva a cabo en el taller de mantenimiento de la compañía, el cual se encuentra en un área industrial y por ende está sujeto a unas reglas de seguridad industrial previamente definidas por la compañía. De igual manera está dotada de algunas condiciones y herramientas que

facilitan las actividades de los trabajadores, estas condiciones hacen parte del escenario y el entorno en el cual opera el prototipo en diseño y las mismas pueden presentar restricciones o requerimientos adicionales a tener en cuenta en el diseño del prototipo.

Restricciones teniendo en cuenta en análisis del entorno y el escenario de operación:

- Fuente de alineación de energía AC hasta 110 V 60 Hz.
- Suministro de aire de instrumentos variante entre 100 y 120 PSIG según las condiciones de la planta.
- Acceso al sitio sólo de personal autorizado.
- Sólo se permite personal idóneo y calificado del área de instrumentación para la operación de dicho prototipo.
- Al ser un área industrial, el personal debe conocer los peligros, riesgos y controles de dicha área, contando con los elementos de protección personal mínimos establecidos por la compañía, botas dieléctricas industriales, casco, gafas, guantes, ropa industrial.
- El taller se comparte con las áreas de mecánica y electricidad de la compañía.

Condiciones favorables teniendo en cuenta en análisis del entorno y el escenario de operación:

- Se cuenta con un sistema de aire acondicionado que permite un control mínimo de las condiciones de temperatura y humedad del taller.
- El taller se encuentra recubierto con una protección para mitigación de ruidos.
- La conexión eléctrica cuenta con los estándares mínimos entre ellos y de resaltar un sistema de puesta a tierra satisfactorio, ideal para el trabajo de equipos electrónicos.
- El taller se encuentra situado en un área apartada del área del proceso garantizando que en este punto no hay atmósferas explosivas ni áreas clasificadas, lo cual sería una gran restricción en el diseño del prototipo.

**6.1.4.3.        *Desarrollo tarea tres: Identificar la interacción entre los usuarios y el sistema.***

La interacción de los usuarios y el sistema debe ser óptima, de fácil entendimiento y debe tener en cuenta el personal idóneo con el que se cuenta actualmente en la compañía para la operación del prototipo; con base a esto, se plantean ciertos requisitos del prototipo como del personal que lo opera, encaminados a garantizar la fácil y correcta operación del mismo:

- La interfaz humano maquina HMI debe ser lo más intuitiva posible permitiendo su operación con un nivel de formación en la misma relativamente sencillo.
- Se deben generar instructivos de operación que permitan de manera didáctica y sencilla a correcta operación del equipo.
- El personal a operar el prototipo, como mínimo, debe ser técnico en el área de instrumentación y control y debe haber asimilado el material didáctico de operación en su totalidad.

**6.1.5. Actividad dos: Analizar y mantener los requerimientos de los grupos de interés.**

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Analizar el conjunto completo de requisitos obtenidos.

**6.1.6. Desarrollo actividad dos: Analizar y mantener los requerimientos de los grupos de interés.**

**6.1.6.1.        *Desarrollo tarea uno: Analizar el conjunto completo de requisitos obtenidos.***

Los requisitos de las partes interesadas relevantes identificados en este punto son:

- Se deben usar, en lo posible, recursos propios ya adquiridos por la compañía y que se encuentren en el almacén.

- La suma total de los materiales usados del almacén y los que se puedan llegar a comprar adicionalmente no pueden superar \$10'000.000, diez millones de pesos colombianos.
- El proyecto debe ser ejecutado con el personal que ya cuenta la empresa en dicha área de mantenimiento.
- El prototipo se debe de poder operar por un solo operario.
- La propuesta debe ser de bajo costo para permitir su implementación y justificación en la efectiva disminución de las horas hombre.
- Se debe contar con fuente de alimentación para los transmisores a verificar.
- Se debe contar con conexiones que faciliten el montaje de los equipos a verificar y los patrones de verificación en el taller de tal forma que la altura entre los equipos patrón y los equipos a verificar sea la misma.
- El prototipo debe permitir la verificación en distintos puntos de presión a través del rango de operación de los equipos a verificar tanto ascendente como descendentemente.
- Se debe permitir trabajar con más de una unidad de presión teniendo en cuenta las distintas unidades de presión que manejan los equipos de la planta.
- El prototipo debe brindar estabilidad en los puntos de verificación con el objetivo de poder comparar correctamente la lectura entre el patrón y el equipo en verificación.
- El tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro debe ser mejor al tiempo que se requeriría con la bomba neumática manual realizar esta operación.
- El prototipo se debe realizar con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW.



- El interfaz humano maquina HMI debe ser lo más intuitiva posible permitiendo su operación con un nivel de formación en la misma relativamente sencillo.
- Se deben generar instructivos de operación que permitan de manera didáctica y sencilla a correcta operación del equipo.
- El personal a operar el prototipo como mínimo debe ser técnico en el área de instrumentación y control y debe haber asimilado el material didáctico de operación en su totalidad.
- Fuente de alineación de energía AC hasta 110 V 60 Hz.
- Suministro de aire de instrumentos variante entre 100 y 120 PSIG según las condiciones de la planta.
- El tiempo de trabajo continuo del prototipo no debe retrasar la ejecución normal de la actividad de verificación.

## 7. Definición de especificaciones

Una vez identificadas y registradas de manera clara las necesidades de las partes interesadas frente al desarrollo del proyecto se inicia el desarrollo de la segunda etapa del mismo, para el desarrollo de esta etapa del proyecto se utiliza como base lo indicado en la norma “ISO/IEC 15288”, “6.4 Technical Processes, 6.4.2 Requirements Analysis Process” (Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 2008, pág. 51) y lo indicado en el libro “Diseño y Desarrollo de Productos”, “Capítulo 6 Especificaciones del producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 93). Como se explica en la metodología de este proyecto, no se sigue estrictamente lo indicado en cada una de las biografías, se toman las prácticas y recomendaciones que se acondicionan a la naturaleza de este proyecto.

El propósito de esta etapa es convertir las necesidades de las partes interesadas en especificaciones técnicas medibles, que permitan evaluar a satisfacción el cumplimiento de las necesidades de las partes interesadas, o como lo indico (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 94), las necesidades hasta ahora identificadas son en su mayoría subjetivas, dejando un margen de interpretación demasiado grande, dificultando el proceso de diseño del prototipo al no tener detalles precisos y medibles de lo que el prototipo tiene que hacer, por tanto las especificaciones aquí dadas tienen una métrica y un valor asociado que indique lo que se requiere y espera realmente del prototipo.

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Se especifican las características, los atributos y los requisitos funcionales y de rendimiento requeridos para una solución de producto.
- Se especifican las restricciones que afectan el diseño arquitectónico de un sistema y los medios para realizarlo.

- Se logra la integridad y la trazabilidad de los requisitos del sistema a los requisitos de las partes interesadas.
- Se define una base para verificar que se cumplen los requisitos del sistema.

Con la ejecución de esta etapa se da cumplimiento al objetivo específico:

- Identificar los requisitos y especificaciones mínimas que debe cumplir el prototipo del banco de presión.

### **7.1. Actividades y tareas**

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan la siguiente actividades y tareas:

#### **7.1.1. Actividad: Definir las especificaciones y/o requisitos del prototipo.**

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Definir y describir la función que el prototipo debe realizar.
2. Definir los requerimientos inevitables que tendrá el prototipo.
3. Elaborar la lista de métricas.
4. Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables.

#### **7.1.2. Desarrollo actividad: Definir las especificaciones y/o requisitos del prototipo.**

##### ***7.1.2.1. Desarrollo tarea uno: Definir y describir la función que el prototipo debe realizar.***

Con base a la información encontrada en el anexo B: “Informe de inspección de hallazgos de falla de equipos de la refinería de HIDROCASANARE”, con fecha del 05 de octubre del 2018 y el anexo C: “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN”, se crea un panorama más claro de la función que debe desempeñar el prototipo, en resumen, se requiere la automatización del proceso de presurización y despresurización necesario para la ejecución de la actividad de

verificación y ajuste de los instrumentos transmisores de presión, acorde con lo que se espera en el desarrollo de esta primera tarea, se procede a describir específicamente la función que debe ejecutar el prototipo:

El prototipo debe contar con una interfaz que permita al operador ingresar un valor de presión objetivo, bien sea ascendente o descendente, esto acorde con el proceso de verificación descrito en el anexo C, en donde los instrumentos se verifican comparando la lectura de los mismos contra la lectura de los equipos patrones en puntos distribuidos uniformemente a 0, 25, 50, 75 y 100% del rango de operación del equipo en verificación, esto se hace inicialmente de manera ascendente y posteriormente de manera descendente, el operador debe poder ingresar cada uno de estos valores y el prototipo debe presurizarse o despresurizarse a la presión objetivo, garantizando estabilidad y un nivel de precisión en dicho punto. En esencia, esta es la función que debe desempeñar el prototipo, remplazando el sistema de presurización utilizado actualmente, el cual costa de una bomba neumática manual con un juego de ajustes manuales finos y gruesos, a continuación, se puede apreciar dicho equipo:

Bomba de prueba neumática 700PTP-1



Figura 16. Bomba de prueba neumática 700PTP-1. (FLUKE Corporation, 2016).

“La 700PTP-1 es una bomba de presión portátil diseñada para generar un vacío de hasta -11,6 psi/-0,8 bares o una presión de hasta 600 psi/40 bares” (FLUKE Corporation, 2016, pág. 31).

**7.1.2.2. Desarrollo tarea dos: Definir los requerimientos inevitables que tendrá el prototipo.**

Una vez identificados las necesidades o requerimientos de las partes interesadas frente al proyecto se seleccionan aquellas que limitan inevitablemente el diseño del prototipo dando forma al mismo y se les asigna una métrica y un grado de importancia de 1 a 5, siendo 5 la más importante, de acuerdo a la información con que se cuenta hasta el momento, a la experiencia del autor en el área a la cual va dirigida el prototipo y el análisis conjunto con las partes interesadas, a continuación, se relacionan dichos requerimientos:

Tabla 4

*Requerimientos inevitables de las partes interesadas.*

| Núm. | Requerimiento   | Importancia |
|------|---|-------------|
| 1    | La suma total de los materiales usados del almacén y los que se puedan llegar a comprar adicionalmente no pueden superar \$10'000.000, diez millones de pesos colombianos.  | 5           |
| 2    | El prototipo se debe de poder operar por un solo operario.  | 2           |
| 3    | Se debe contar con fuente de alimentación para los transmisores a verificar.  | 4           |
| 4    | Se debe contar con conexiones que faciliten el montaje de los equipos a verificar y los patrones de verificación en el taller de tal forma que la altura entre los equipos patrón y los equipos a verificar sea la misma. | 4           |
| 5    | El prototipo debe permitir la verificación en distintos puntos de presión a través del rango de operación de los equipos a verificar tanto ascendente como descendentemente.  | 5           |
| 6    | Se debe permitir trabajar con más de una unidad de presión teniendo en cuenta las distintas unidades de presión que manejan los equipos de la planta.   | 5           |

|    |   |   |
|----|---|---|
| 7  | El prototipo debe brindar estabilidad en los puntos de verificación con el objetivo de poder comparar correctamente la lectura entre el patrón y el equipo en verificación.                         | 5 |
| 8  | El tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro debe ser mejor al tiempo que se requeriría con la bomba neumática manual realizar esta operación. | 5 |
| 9  | El prototipo se debe realizar con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW.  | 3 |
| 10 | El interfaz humano maquina HMI debe ser lo más intuitiva posible permitiendo su operación con un nivel de formación en la misma relativamente sencillo.   | 4 |
| 11 | Fuente de alineación de energía AC hasta 110 V 60 Hz.   | 5 |
| 12 | Suministro de aire de instrumentos variante entre 100 y 120 PSIG según las condiciones de la planta.  | 4 |
| 13 | El tiempo de trabajo continuo del prototipo no debe retrasar la ejecución normal de la actividad de verificación.   | 5 |

### 7.1.2.3. *Desarrollo tarea tres: Elaborar la lista de métricas.*

En la primera etapa se identifican los requerimientos o necesidades de las partes interesadas frente a el funcionamiento y el diseño del prototipo y en la tarea dos de esta etapa se identifican aquellas que inevitablemente dan forma al prototipo, sin embargo como ya se explicó, son subjetivas y carecen de una métrica que permita verificar realmente que tanto restringen y definen el desarrollo del prototipo, a continuación se asigna una métrica y un grado de importancia de 1 a 5, siendo 5 la más importante, de acuerdo a la información con que se cuenta hasta el momento y el análisis conjunto con las partes interesadas, esto permite tener las especificaciones que describan de manera precisa lo que el prototipo tiene que hacer:

Tabla 5

*Métrica asociada a cada requerimiento.*

| Métrica | Núm. | Métrica | Imp. | Unidad |
|---------|------|---------|------|--------|
|---------|------|---------|------|--------|

| numero | Req. |  |   |                       |
|--------|------|--|---|-----------------------|
| 1      | 1    | Cantidad de dinero gastado en el proyecto.   | 5 | \$ Pesos Colombianos. |
| 2      | 2    | Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.  | 2 | Unidad.               |
| 3      | 3    | Voltaje de alimentación DC.  | 4 | VDC                   |
| 4      | 4    | Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación.             | 4 | Unidad.               |
| 5      | 4    | Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.                           | 4 | Cm.                   |
| 6      | 5    | Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos   | 5 | Unidad.               |
| 7      | 6    | Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar   | 5 | Unidad.               |
| 8      | 7,8  | Tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.                                | 5 | Segundos.             |
| 9      | 7    | Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varía o no.                           | 4 | Unidad                |
| 10     | 8    | Tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro.                          | 5 | Segundos.             |
| 11     | 9    | El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW. | 3 | Subjetivo.            |
| 12     | 10   | Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.  | 5 | Lista.                |
| 13     | 10   | Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo.  | 5 | Lista                 |
| 14     | 10   | Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.  | 5 | Horas.                |
| 15     | 10   | Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.   | 5 | Subjetivo.            |
| 16     | 11   | Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.  | 5 | VAC/Hz.               |
| 17     | 12   | Presión de aire de instrumentos disponible.  | 4 | PSIG.                 |
| 18     | 13   | Tiempo de operación continuo del prototipo   | 5 | Horas.                |

A continuación, se realiza una matriz en donde se relaciona el requerimiento y la métrica que satisface dicha necesidad.

|                      |    | Numero Métrica |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------------|----|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                      |    | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Numero Requerimiento | 1  | •              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 2  |                | • |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 3  |                |   | • |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 4  |                |   |   | • | • |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 5  |                |   |   |   |   | • |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 6  |                |   |   |   |   |   | • |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 7  |                |   |   |   |   |   |   | • | • |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 8  |                |   |   |   |   |   |   | • |   | •  |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 9  |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | •  |    |    |    |    |    |    |    |
|                      | 10 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | •  | •  | •  | •  |    |    |    |
|                      | 11 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | •  |    |    |
|                      | 12 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | •  |    |
|                      | 13 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | •  |

Figura 17. Matriz requerimiento vs métrica. Fuente: El autor.

En la matriz se observa que los requerimientos en su totalidad cuentan con por lo menos una métrica que lo especifica de manera clara.

#### 7.1.2.4. *Desarrollo tarea cuatro: Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables.*

En esta etapa en mutuo acuerdo con las partes interesadas se sintetiza la información obtenida hasta el momento con el objeto de asignar valores a cada métrica, para ello se usan dos tipos de valores de referencia el valor ideal y el valor marginalmente aceptable. Según (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 103 ) lo aplicado para este proyecto, el valor ideal hace referencia al mejor resultado o rendimiento que se puede esperar del prototipo y el valor



marginalmente aceptable hace referencia a aquel valor que se encuentra en el límite de ser o no viable para satisfacer los requerimientos y/o necesidades de las partes interesadas.

Tabla 6

*Valores meta ideales y marginalmente aceptables.*

| Métrica | Núm. | Métrica  | Imp | Unidad    | Valor    | Valor    |
|---------|------|--|-----|-----------|----------|----------|
| Núm.    | Req. |  |     |           | Ideal    | Marginal |
| 1       | 1    | Cantidad de dinero gastado en el proyecto.   | 5   | \$.       | <1000000 | <1000000 |
| 2       | 2    | Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.  | 2   | Unidad.   | 1        | 1        |
| 3       | 3    | Voltaje de alimentación DC.  | 4   | VDC       | 24       | 18-30    |
| 4       | 4    | Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación. | 4   | Unidad.   | >2       | 2        |
| 5       | 4    | Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.               | 4   | Cm.       | 0        | <1       |
| 6       | 5    | Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos   | 5   | Unidad.   | >5       | 5        |
| 7       | 6    | Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar   | 5   | Unidad.   | >2       | 2        |
| 8       | 7,8  | Tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.                    | 5   | Segundos. | 30       | >10      |
| 9       | 7    | Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varía o no.               | 4   | Unidad    | 2        | 1        |
| 10      | 8    | Tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro.              | 5   | Segundos. | >180     | <300     |

|    |    |  |   |            |        |               |
|----|----|--|---|------------|--------|---------------|
| 11 | 9  | El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW. | 3 | Subjetivo. | Cumple | Cumple        |
| 12 | 10 | Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.  | 5 | Lista.     | 20     | <50           |
| 13 | 10 | Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo.  | 5 | Lista      | 5      | <25           |
| 14 | 10 | Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.  | 5 | Horas.     | 4      | <8            |
| 15 | 10 | Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.   | 5 | Subjetivo. | Cumple | Cumple        |
| 16 | 11 | Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.  | 5 | VAC/Hz.    | 110/60 | 100-120/50-60 |
| 17 | 12 | Presión de aire de instrumentos disponible.  | 4 | PSIG.      | >100   | >100          |
| 18 | 13 | Tiempo de operación continuo del prototipo.  | 5 | Horas.     | >4     | >4            |

Los objetivos meta y marginales identificados en la anterior tabla de ahora en adelante son las especificaciones técnicas que se usan como guía para las siguientes etapas definiendo el concepto del prototipo y evaluando la aceptación del mismo una vez planeado y construido.

## 8. Generación de concepto

Una vez identificadas y registradas las especificaciones técnicas y la función que el prototipo debe desempeñarse tiene lo necesario para generar el concepto del prototipo, para el desarrollo de esta etapa se utiliza como base las recomendaciones en el libro “Diseño y desarrollo de productos, “Capítulo 7 Generación de conceptos” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 120)”.

El propósito de esta etapa es por medio de la generación del concepto del prototipo brindar una descripción muy cercana a la realidad de la tecnología, la forma y el principio de funcionamiento del mismo, esto se realiza por medio de la descripción conceptual presentada en diagramas de bloques y/o mapas de flujo.

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Identificar posibles tecnologías a utilizar en el desarrollo del prototipo.
- Determinar opciones de forma y principio de funcionamiento viables para el desarrollo del prototipo.
- Identificar posibles descripciones conceptuales que permitan el desarrollo del prototipo.

Con la ejecución de esta etapa se da inicio al cumplimiento del objetivo específico:

- Determinar la teoría de funcionamiento del prototipo del banco de presión.

### 8.1. Actividades y tareas

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan la siguiente actividades y tareas:

#### 8.1.1. Actividad uno: Aclarar el problema.

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Descomponer un problema complejo en subproblemas más sencillos.

2. Enfocar el trabajo inicial en subproblemas críticos.

### 8.1.2. Desarrollo actividad uno: Aclarar el problema.

#### 8.1.2.1. *Desarrollo tarea uno: Descomponer un problema complejo en subproblemas más sencillos.*

Se realiza la descomposición del problema mediante la metodología de descomposición funcional, a continuación, y como primer paso de esta metodología se representa el problema como una caja negra por medio de la cual se representa la función general del prototipo. En el diagrama las líneas azules indican la conversión de la energía, las líneas negras indican el movimiento del material dentro del sistema y las líneas discontinuas verdes representan las señales de flujo de control y retroalimentación dentro del sistema (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 123).

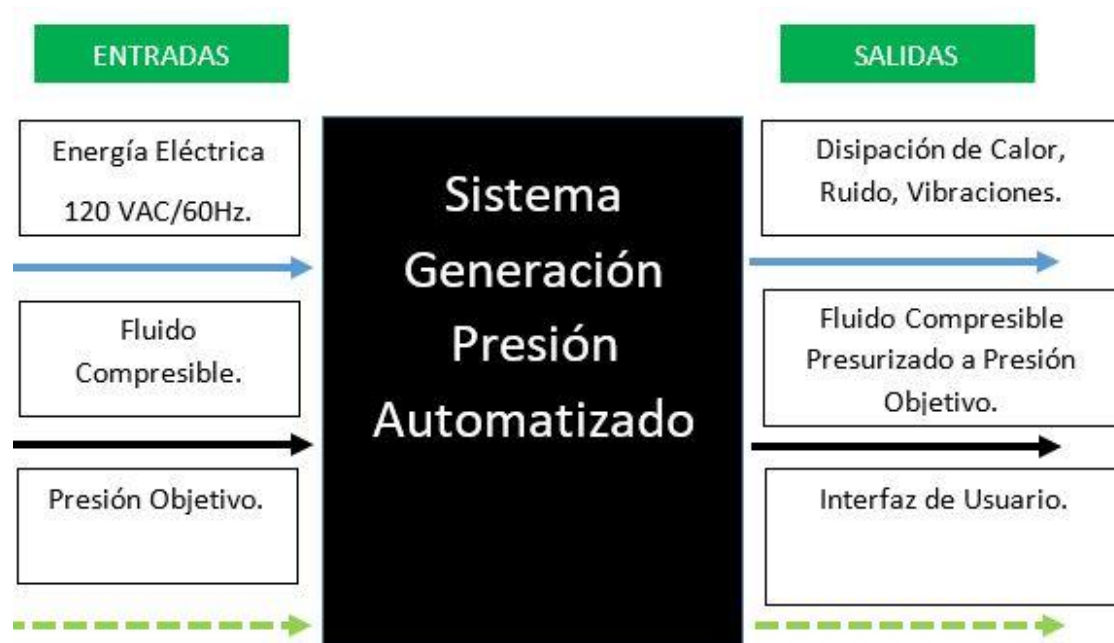


Figura 18. Caja negra descomposición funcional prototipo. Fuente: El autor.

Como segundo paso se procede a dividir la caja negra en subfunciones que permitan mostrar una descripción más específica de los elementos que pueden hacer parte de la función general del prototipo, esto se puede apreciar en el siguiente diagrama, en donde las líneas azules indican la conversión de la energía, las líneas negras indican el movimiento del

material dentro del sistema y las líneas discontinuas verdes representan las señales de flujo de control y retroalimentación dentro del sistema (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 123).

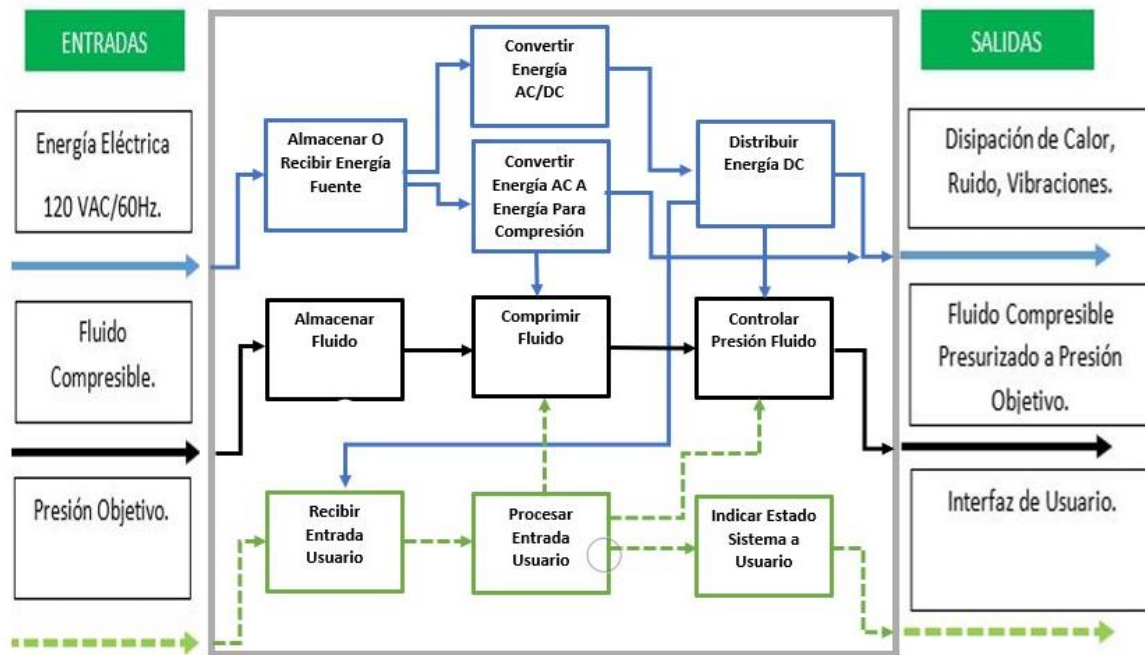


Figura 19. Diagrama de subfunciones prototipo. Fuente: El autor.

**8.1.2.2. Desarrollo tarea dos: Enfocar el trabajo inicial en subproblemas críticos.**

Una vez dividido la función principal del prototipo en subprocesos más sencillos, se seleccionan aquellos que se consideran más críticos para el desarrollo del prototipo aquellos que afectan considerablemente el resultado final del mismo, el cumplimiento de las especificaciones técnicas y la satisfacción de las necesidades del cliente, para este proceso se realiza el siguiente análisis asignando un nivel de prioridad bajo-alto según corresponda:

Tabla 7

*Análisis criticidad de subprocesos.*

| Subprocesos                        | Análisis   | Prioridad |
|------------------------------------|--|-----------|
| Almacenar o recibir energía fuente | En los requisitos y el análisis realizado previamente de las condiciones de operación a las que estarán sujeto el prototipo, se estableció que la energía con la cual debe trabajar es 110 VAC, esta energía se tomara de un | Bajo      |

---

|   |  |      |
|---|--|------|
|   | tomacorriente 110 facilitado por la instalación eléctrica del taller en donde operara el prototipo.  |      |
| Convertir energía AC/DC.                        | Para la alimentación de los equipos en verificación es necesario contar con alimentación 24 VDC, esto se realizará de la manera convencional utilizando una fuente o regulador de voltaje AC/DC.   | Bajo |
| Convertir energía AC a energía para compresión. | Este sub proceso hasta este punto no está bien definido y se pueden proponer varias formas de energía para realizar la compresión a través de la conversión de la energía AC ya indicada en las especificaciones.  | Alto |
| Distribuir energía DC                           | La distribución de la energía DC se puede realizar de distintas formas, circuitos impresos, circuitos cableados, etc. sin embargo, teniendo en cuenta que el prototipo operara en un área industrial y se debe tener en cuenta la facilidad de diagnóstico y reparación del mismo, el circuito cableado resalta como la mejor opción.  | Bajo |
| Almacenar fluido                                | El fluido compresible que se escoja para el desarrollo del prototipo independientemente de si es liquido o gaseoso se almacenará en tubería de acero inoxidable o acero al carbón, tuberías con las cuales la parte interesada cuenta en distintas presentaciones en el almacén y son ampliamente utilizadas por su resistencia a las altas presiones.   | Bajo |
| Comprimir fluido                                | El principio utilizado para la compresión del fluido marcará el resultado final del mismo y servirá de base para definir otros subprocesos.  | Alto |
| Controlar presión fluido                        | Para que se cumplan las especificaciones técnicas previamente definidas el control de presión del prototipo debe ser analizado al detalle, la selección del sistema de control de presión y su correcta implementación definirán en gran manera si el prototipo cumple o no con dichas especificaciones, por ende, el control se debe analizar desde dos puntos de vista, la selección del hardware y el método de control a utilizar PID, Adaptativo, Lógica Difusa, etc. | Alto |
| Recibir entrada usuario                         | En los requisitos ya se planteó que para la interfaz se debe hacer uso del software LabVIEW, por ende, un método de entrada a través de teclado será lo ideal para este subproceso.  | Bajo |

---

|                                  |  |      |
|----------------------------------|--|------|
| Procesar entrada usuario         | De acuerdo a las necesidades y requisitos presentados por el cliente se presentan dos situaciones, el procesamiento se realizará a través del software del PC o a través de las tarjetas de desarrollo Arduino, frente a esto y al comparar las capacidades de procesamiento de cada uno es evidente que la mejor opción es realizar el mismo a través de la utilización del software del PC, utilizando las tarjetas de desarrollo Arduino como tarjetas de adquisición de datos. | Bajo |
| Indicar estado sistema a usuario | En los requisitos ya se planteó que para la interfaz se debe hacer uso del software LabVIEW, por ende, se pueden implementar diversos métodos de indicación de estado a través de la pantalla de visualización del software, testigos luminosos, graficas, indicación de lectura puntual, etc.   | Bajo |

Con base al anterior análisis los subprocesos que representan un nivel de criticidad alto frente al éxito o no del prototipo son:

- Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión.
- Comprimir fluido.
- Controlar presión de fluido.

#### **8.1.3. Actividad dos: Buscar externamente.**

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Buscar literatura publicada.
2. Comparación de productos relacionados.

#### **8.1.4. Desarrollo actividad dos: Buscar externamente.**

Con el objetivo de optimizar el desarrollo del prototipo se busca información externa que permita brindar soluciones a los subprocesos críticos identificados, esto permite centrarse en la solución de los subprocesos críticos si soluciones conocidas previamente.

#### **8.1.4.1.        *Desarrollo tarea uno: Buscar literatura publicada.***

Se realiza investigación a través del internet a diferentes revistas, páginas de fabricantes de este equipo como el prototipo a diseñar, manuales técnicos, “HANDBOOK” de ingeniería de distintos fabricantes, dentro de la información relevante encontrada resalta:

- “Calibration Technology Basics, reference instruments for pressure and temperature, professional calibration [Fundamentos de la tecnología de calibración, instrumentos de referencia para presión y temperatura, calibración profesional]”, este libro de (Wiegand & Elbert, 2012), afirma según sus autores: “La rentabilidad de la calibración de los instrumentos de medición de presión y de su documentación depende del nivel de automatización posible” (Wiegand & Elbert, 2012, pág. 34). Los autores presentan un sistema automatizado para la calibración de instrumentos de presión de la empresa WIKA, los autores afirman que el proceso se puede automatizar a un alto grado de control, teniendo en cuenta la variedad de instrumentos de medición de presión con salida electrónica, su uso simultáneo con un controlador de presión brinda grandes resultados. En detalle describen un sistema en donde se suministra una presión inicial superior a la presión objetivo a controlar, utilizando gases o líquidos comprimidos y almacenados previamente, en donde para presiones por debajo de 400 BAR utilizan los gases y para presiones mayores a 400 BAR utilizan los líquidos, un sensor de presión electrónico mide la presión objetivo suministrada la cual se controla por una válvula de aguja precisa que permita una apertura al fluido comprimido más o menos continuamente variable, esto permite un control aunque lento estable, permitiendo incluso llegar a compensar cualquier pérdida leve de presión causada por los sistemas aguas abajo de la regulación.





Figura 20. Ejemplo de equipo de control preciso de presión automático. (Wiegand & Elbert, 2012, pág. 35)

Como resultado de la búsqueda externa de literatura se identifican soluciones viables para los tres subprocesos críticos identificados previamente, por medio de la utilización de un fluido compresible previamente comprimido como lo puede ser una botella de nitrógeno comprimido o el aire de instrumentos disponible en el taller dónde operaría el prototipo, se solucionaría el sub proceso convertir energía eléctrica AC a energía para compresión y el subproceso comprimir fluido, adicionalmente se plantea que por medio de la utilización de una válvula de aguja se puede controlar de manera lenta pero precisa la presión objetivo a la cual se pretende llegar, esto daría solución a el tercer subproceso crítico controlar presión de fluido.

#### **8.1.4.2. Desarrollo tarea dos: Comparación de productos relacionados.**

Se realiza consulta atreves del internet de distintos fabricantes de productos similares al que se pretende diseñar de los cuales resaltaron:

- Fabricante: WIKA. nombre: Controlador de presión High-End Modelo CPC8000.  
Principio de operación: A partir de una presión de suministro mayor a la presión objetivo el controlador regula la presión.



Figura 21. CPC8000. (Instrumentos WIKA Colombia S.A.S., 2019).

- Fabricante: FLUKE. nombre: Controladores/calibradores modulares de alta presión 8270A y 8370A. Principio de operación: A partir de una presión de suministro mayor a la presión objetivo el controlador regula la presión.



Figura 22. Controlador 8270A y 8370A. (Fluke Corporation, 2019).

- Fabricante: AUDEW. nombre: Inflador digital de neumáticos 12VDC. Principio de operación: Con la utilización de un motor DC con transmisión acoplado a un embolo junto con la combinación de válvulas cheque de admisión y escape y un sistema de control automático de lazo cerrado logra alcanzar presiones de hasta 150 PSIG.



Figura 23. Inflador digital de neumáticos 12VDC AUDEW. (AUDEW, 2018).

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre las especificaciones de los productos que resaltan en las consultas realizadas y las especificaciones objetivo del prototipo a diseñar resalta:

Tabla 8

*Comparación prototipo y productos existentes.*

| Especificaciones Prototipo   |           |          | Cumplimiento | Cumplimiento | Cumplimiento  |
|--|-----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| Métrica  | Unidad    | Valor    | CPC8000      | 8270A        | AUDEW         |
| Marginal   |           |          |              |              |               |
| Cantidad de dinero gastado en el proyecto.   | \$.       | <1000000 | no           | no           | SI            |
| Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.  | Unidad.   | 1        | SI           | SI           | SI            |
| Voltaje de alimentación DC.  | VDC       | 18-30    | no           | SI           | no            |
| Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación. | Unidad.   | 2        | no           | no           | no            |
| Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.               | Cm.       | <1       | SI           | SI           | no            |
| Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos   | Unidad.   | 5        | SI           | SI           | SI            |
| Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar   | Unidad.   | 2        | SI           | SI           | SI            |
| Tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.                    | Segundos. | >10      | si           | SI           | no Especifica |

|  |            |                   |               |               |               |
|--|------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varia o no.                           | Unidad     | 1                 | SI            | SI            | no Especifica |
| Tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro.                          | Segundos.  | <300              | SI            | SI            | SI            |
| El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW. | Subjetivo. | Cumple            | no            | no            | no            |
| Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.  | Lista.     | <50               | no Especifica | no Especifica | SI            |
| Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo.  | Lista      | <25               | no Especifica | no Especifica | SI            |
| Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.  | Horas.     | <8                | no Especifica | no Especifica | no Especifica |
| Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.   | Subjetivo. | Cumple            | no Especifica | no Especifica | no Especifica |
| Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.  | VAC/Hz.    | 100-<br>120/50-60 | SI            | SI            | no            |
| Presión de aire de instrumentos disponible.  | PSIG.      | >100              | SI            | SI            | SI            |
| Tiempo de operación continuo del prototipo   | Horas.     | >8                | SI            | SI            | no            |

---

nota: La información detallada en la tabla es tomada de (Instrumentos WIKA Colombia S.A.S., 2019), (Fluke Corporation, 2019) y (AUDEW, 2018) respectivamente.

Con la búsqueda externa de comparación de productos se observa que la idea no es novedosa, sin embargo, especificaciones relevantes para las necesidades del cliente no se cumplen con los productos ya existentes. Los principios de funcionamiento de los productos existentes como lo son el **CPC8000** de WIKA y el **8270A** de FLUKE y lo planteado en la literatura consultada coinciden, lo que indica una gran aceptación del mismo y le da más validez para ser implementado en el prototipo al observarse que productos con dicho principio de funcionamiento cumplen varios de las especificaciones que satisfacen las necesidades del cliente.

#### **8.1.5. Actividad dos: Buscar internamente.**

Esta actividad consta de la siguiente tarea:

1. Plantear propuestas creativas de acuerdo al conocimiento personal.

#### **8.1.6. Desarrollo actividad dos: Buscar internamente.**

##### **8.1.6.1. *Desarrollo tarea uno: Plantear propuestas creativas de acuerdo al conocimiento personal.***

A través del uso de la creatividad conocimiento personal se generan varios conceptos a través de la metodología lluvia de ideas.

En la siguiente tabla se evidencian las ideas más relevantes planteadas para el concepto que podría satisfacer las especificaciones y necesidades del cliente, se especifica la solución que se plantearía para cada uno de los subprocessos críticos identificados:

Tabla 9

#### *Propuestas búsqueda interna.*

| Descripción del concepto | Sub-Proceso Critico |                                  |                   |
|--------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------|
|                          |                     | Convertir energía eléctrica AC a | Comprimir fluido. |

|  | energía para<br>compresión.                          |  |   |
|--|--|--|---|
| Utilizar un mini compresor portátil de aire DC recíproco utilizado para el llenado de las llantas de los automóviles y controlar la presión de compresión a través de la variación de la velocidad del motor por medio del control y regulación voltaje de alimentación DC a través de un PWM. | Energía<br>Mecánica por medio de un motor eléctrico. | Utilización de un sistema de embolo.           | Regulación velocidad de rotación motor.                                 |
| Utilizar un motor acoplado a un tornillo sin fin que permita la compresión de agua a través de un embolo que modifique el área de almacenamiento del agua comprimiendo la misma.   | Energía<br>Mecánica por medio de un motor eléctrico. | Utilización de un sistema de embolo.           | Regulación velocidad de rotación motor.                                 |
| Utilizar un sistema no rotativo a través de un solenoide que comprima y descomprima un resorte fijado a un embolo el cual con el uso de dos cheques uno para la admisión de agua y otro para la descarga compriman la misma.   | Energía<br>Mecánica por medio de un solenoide.       | Utilización de un sistema de embolo resortado. | Regulación por intermitencias energización y desenergización solenoide. |
| Implementar un sistema de generación de vapor aprovechando la energía térmica del vapor de agua a través de una resistencia que evapore el agua a la presión deseada y se controle por medio de la regulación de un escape atmosférico.  | Energía Térmica por medio de una resistencia         | Expansión térmica                              | Regulación escape atmosférico   |

### 8.1.7. Actividad cuatro: Explorar sistemáticamente.

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Generar árbol de clasificación de conceptos.

2. Diseñar tabla de combinación de conceptos.

### 8.1.8. Desarrollo actividad cuatro: Explorar sistemáticamente.

#### 8.1.8.1. Desarrollo tarea uno: Generar árbol de clasificación de conceptos.

Con el objetivo de comparar y eliminar posibles soluciones reduciendo y aclarando la panorámica del concepto se realiza un árbol de clasificación de concepto del subproceso crítico “Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión”, al identificar que este subproblema en particular restringe en alto grado las posibles soluciones de los subproblemas restantes (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 135).

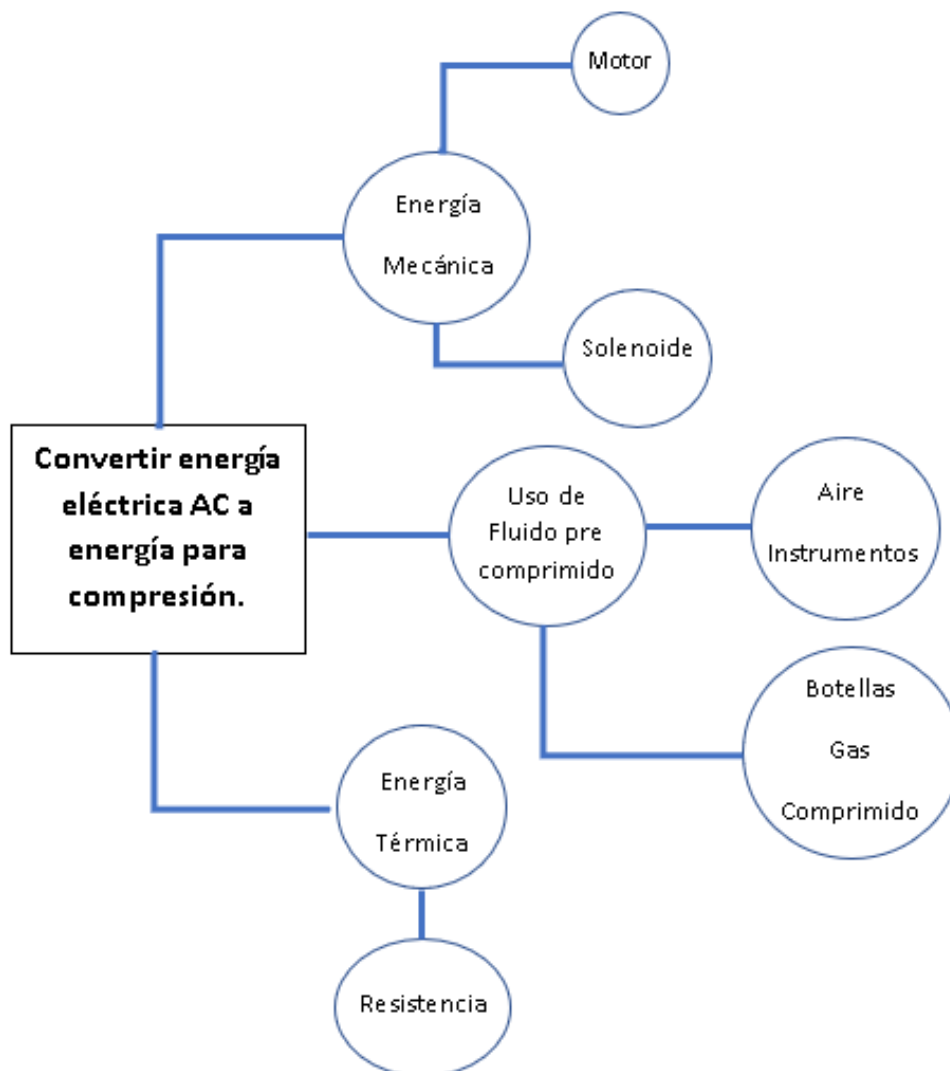


Figura 24. Árbol de clasificación de concepto del subproceso crítico. Fuente: El autor.

Mediante el análisis del árbol se identifica que la rama de la energía térmica es poco promisoría al presentar desventajas tales como la necesidad de agua constante, un sistema de retorno de agua condensada por el vapor y la alta temperatura que se manejaría en el mismo arriesgando al operador y restringiendo los requisitos de materiales necesarios para su construcción.

#### **8.1.8.2. Desarrollo tarea dos: Diseñar tabla de combinación de conceptos.**

Con la utilización de la una table de combinación de conceptos se pretende considerar la generación de nuevos conceptos a partir de la combinación sistemática de los conceptos hasta el momento identificados y sus soluciones para cada uno de los subprocessos críticos.

Tabla 10

*Tabla para combinación de conceptos.*

|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión. | Comprimir fluido.         | Controlar presión de fluido.                    |
| Motor rotatorio con transmisión                           | Embolo o Pistón           | Regulación por escape atmosférico               |
| Motor Lineal  | Membrana                  | Regulación por restricciones en la succión.     |
| Solenoides  | Paletas                   | Regulación por restricción en la descarga       |
| Uso de fluido pre comprimido.                             | Lóbulos.                  | Regulación por velocidad de rotación.           |
|   | Tornillos helicoidales.   | Regulación por intermitencias de accionamiento. |
|   | Aire de instrumentos      |   |
|   | Botella de gas comprimido |   |

Como se observa en la tabla se tiene tres fragmentos de combinación en la primera columna siete en la segunda columna y cinco en la tercera columna para un total de 105



posibles combinaciones ( $3 \times 7 \times 5 = 105$ ), sin embargo, es claro que a simple vista muchas de esas combinaciones no tienen sentido alguno.

Como posibles combinaciones posibles se tienen las siguientes tablas a continuación en donde lo resaltado en verde indica la posible combinación:

Tabla 11

*Primera combinación de conceptos posible.*

| Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión. | Comprimir fluido.         | Controlar presión de fluido.                    |
|---|---------------------------|---|
| Motor rotatorio con transmisión                           | Embolo o Pistón           | Regulación por escape atmosférico               |
| Motor Lineal  | Membrana                  | Regulación por restricciones en la succión.     |
| Solenoides  | Paletas                   | Regulación por restricción en la descarga       |
| Uso de fluido pre comprimido.                             | Lóbulos.                  | Regulación por velocidad de rotación.           |
|   | Tornillos helicoidales.   | Regulación por intermitencias de accionamiento. |
|   | Aire de instrumentos      |   |
|   | Botella de gas comprimido |   |

Es evidente que al combinar el motor rotatorio con trasmisor con el embolo, membrana, paletas, lóbulos o tornillos helicoidales se obtiene un compresor con sus diferentes configuraciones de funcionamiento resaltándose de esta opción la posibilidad de combinarse con todas las posibles soluciones para controlar la presión, esta combinación respalda el concepto propuesto en la búsqueda interna: Utilizar un mini compresor portátil de aire DC reciproco utilizado para el llenado de las llantas de los automóviles y controlar la presión de compresión a través de la variación de la velocidad del motor por medio del control

y regulación voltaje de alimentación DC a través de un PWM, y la búsqueda externa Inflador digital de neumáticos 12VDC AUDEW, no obstante le agrega las múltiples posibilidades del control de la presión no contempladas en dichas propuestas.

Tabla 12

*Segunda combinación de conceptos posible.*

|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión. | Comprimir fluido.         | Controlar presión de fluido.                    |
| Motor rotatorio con transmisión                           | Embolo o Pistón           | Regulación por escape atmosférico               |
| Motor Lineal  | Membrana                  | Regulación por restricciones en la succión.     |
| Solenoides  | Paletas                   | Regulación por restricción en la descarga       |
| Uso de fluido pre comprimido.                             | Lóbulos.                  | Regulación por velocidad de rotación.           |
|   | Tornillos helicoidales.   | Regulación por intermitencias de accionamiento. |
|   | Aire de instrumentos      |   |
|   | Botella de gas comprimido |   |

La combinación del motor lineal solo es posible de realizar con un embolo o pistón respaldando el segundo concepto propuesto en la búsqueda interna: Utilizar un motor acoplado a un tornillo sin fin que permita la compresión de agua a través de un embolo que modifique el área de almacenamiento del agua comprimiendo la misma, en donde el único control posible evidente será controlar la velocidad del motor lineal.

Tabla 13

*Tercera combinación de conceptos posible.*

|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión. | Comprimir fluido.         | Controlar presión de fluido.                    |
| Motor rotatorio con transmisión                           | Embolo o Pistón           | Regulación por escape atmosférico               |
| Motor Lineal  | Membrana                  | Regulación por restricciones en la succión.     |
| Solenoides  | Paletas                   | Regulación por restricción en la descarga       |
| Uso de fluido pre comprimido.                             | Lóbulos.                  | Regulación por velocidad de rotación.           |
|   | Tornillos helicoidales.   | Regulación por intermitencias de accionamiento. |
|   | Aire de instrumentos      |   |
|   | Botella de gas comprimido |   |

En un caso similar al anterior no existe otro método de compresión de los ya identificados que pueda combinarse con la solenoide a diferencia de un pistón, esta combinación respalda el tercer concepto propuesto en la búsqueda interna: Utilizar un sistema no rotativo a través de un solenoide que comprima y descomprima un resorte fijado a un embolo el cual con el uso de dos cheques uno para la admisión de agua y otro para la descarga compriman la misma, no obstante se identifica que se pueden implementar más opciones para control de la presión enriqueciendo la propuesta.

Tabla 14

*Cuarta combinación de conceptos posible.*

|   |                   |                              |
|---|-------------------|------------------------------|
| Convertir energía eléctrica AC a energía para compresión. | Comprimir fluido. | Controlar presión de fluido. |
|---|-------------------|------------------------------|

|                                 |                           |   |
|---------------------------------|---------------------------|---|
| Motor rotatorio con transmisión | Embolo o Pistón           | Regulación por escape atmosférico               |
| Motor Lineal                    | Membrana                  | Regulación por restricciones en la succión.     |
| Solenoides                      | Paletas                   | Regulación por restricción en la descarga       |
| Uso de fluido pre comprimido.   | Lóbulos.                  | Regulación por velocidad de rotación.           |
|                                 | Tornillos helicoidales.   | Regulación por intermitencias de accionamiento. |
|                                 | Aire de instrumentos      |   |
|                                 | Botella de gas comprimido |   |

Por ultimo pero no menos importante se tiene la combinación del uso de un fluido pre comprimido que bien puede ser el aire de instrumentos de la planta o botellas de gas comprimido como el nitrógeno o el helio los cuales al regular la descarga por medio de restricción en la misma o por medio de un escape atmosférico permitirían el control de la presión, esta combinación respalda el concepto planteado en la búsqueda externa realizada en donde tanto la literatura consultada como la comparación de los productos ya existentes con las especificaciones a cumplir por el prototipo, coincidieron en un concepto en donde a través del suministro del fluido pre comprimido y el control de la presión por medio de una válvula de aguja automatizada con servomotores de alto torque, se logra llegar a la presión objetivo.

#### **8.1.9. Actividad cinco: Reflexionar sobre las soluciones y el proceso.**

Esta actividad consta de la siguiente tarea:

1. Selección justificada de los posibles conceptos para desarrollar el prototipo.

#### **8.1.10. Desarrollo actividad cinco: Reflexionar sobre las soluciones y el proceso.**

Como resultado del proceso de generación de conceptos se generan un total de cuatro conceptos los cuales han sido analizados teniendo en cuenta el análisis realizado en las

fuentes externas e internas, adicionalmente se evaluó la posibilidad de combinar o mejorar dichos conceptos con los demás, a continuación, se relacionan los conceptos generados en esta etapa del proyecto y los cuales serán el insumo para la posterior etapa de selección de concepto.

- **Concepto uno:** Utilizar un mini compresor portátil de aire DC reciproco utilizado para el llenado de las llantas de los automóviles y controlar la presión de compresión a través de la variación de la velocidad del motor por medio del control y regulación voltaje de alimentación DC a través de un PWM.
- **Concepto dos:** Utilizar un motor acoplado a un tornillo sin fin que permita la compresión de agua a través de un embolo que modifique el área de almacenamiento del agua comprimiendo la misma.
- **Concepto tres:** Utilizar un sistema no rotativo a través de un solenoide que comprima y descomprima un resorte fijado a un embolo el cual con el uso de dos chequeos uno para la admisión de agua y otro para la descarga compriman la misma.
- **Concepto cuatro:** A través del suministro del fluido pre comprimido y el control de la presión por medio de una válvula de aguja automatizada con servomotores de alto torque, se logra llegar a la presión objetivo.

## 9. Selección del concepto

En la etapa anterior se identificaron cuatro conceptos que podrían satisfacer las especificaciones del prototipo a diseñar, en esta etapa se procederá por medio de la implementación de un método estructurado, seleccionar el concepto que sería objeto de la posterior construcción y prueba del mismo, para el desarrollo de esta etapa se utiliza como base las recomendaciones en el libro Diseño y desarrollo de productos, “Capítulo 8 Selección de concepto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 143) y “Capítulo 10 Arquitectura del producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 183).

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Evaluar de manera estructurada los conceptos hasta el momento generados.
- Seleccionar el concepto que pasara a la posterior construcción y prueba.

Con la ejecución de esta etapa se da cumplimiento al objetivo específico:

- Determinar la teoría de funcionamiento del prototipo del banco de presión.

### 9.1. Actividades y tareas

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan la siguiente actividades y tareas:

1. Realizar filtrado de conceptos.
2. Definir teoría de funcionamiento del prototipo.

#### 9.1.1. Actividad uno: Filtrado de conceptos.

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Elaborar la matriz de selección.
2. Evaluar los conceptos.
3. Ordenar los conceptos.
4. Combinar y mejorar los conceptos.

5. Seleccionar uno o más conceptos.
6. Reflexionar sobre los resultados y el proceso.

### 9.1.2. Desarrollo actividad uno: Filtrado de conceptos.

"El filtrado de conceptos se basa en un método desarrollado por el desaparecido Stuart Pugh en la década de 1980, que a veces también se le llama matriz de selección de conceptos de Pugh (Pugh, 1990)" (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 150). "Los fines de esta etapa son reducir rápidamente el número de conceptos y mejorarlos" (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 150).

#### 9.1.2.1. Desarrollo tarea uno: Elaborar la matriz de selección.

La matriz de selección se realiza teniendo en cuenta los requisitos de las partes interesadas y algunas de las especificaciones que pueden marcar una gran diferencia al momento de seleccionar el concepto, como concepto de referencia o comparación se utilizara el concepto uno el cual tiene mucha similitud con el producto "Inflador digital de neumáticos 12VDC de ADEW" explicado en la etapa de búsqueda externa siendo una opción de mejora para el producto.

| CRITERIOS DE SELECCIÓN   | CONCEPTOS |     |      |        |
|--|-----------|-----|------|--------|
|  | Uno Ref.  | Dos | Tres | Cuatro |
| Facilidad de construcción con los recursos ya adquiridos por la empresa.   |           |     |      |        |
| Costo de fabricación total menor a \$10000000.   |           |     |      |        |
| Facilidad de construcción con el recurso humano actual de la compañía.   |           |     |      |        |
| Facilidad para alimentación 24 VDC de los transmisores de presión en verificación.   |           |     |      |        |
| Complejidad baja de construcción.  |           |     |      |        |
| Resuelve de manera eficiente los sub procesos críticos identificados.  |           |     |      |        |
| Garantía de cumplimiento del tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro. |           |     |      |        |
| Garantía de cumplimiento del tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.       |           |     |      |        |
| Facilidad en la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW para la construcción.      |           |     |      |        |
| Garantía de un número de conexiones para la los equipos necesarios para el proceso de verificación mayor a 2                 |           |     |      |        |
| En la búsqueda externa se evidencian productos similares que aporten credibilidad y respaldo al concepto.                    |           |     |      |        |
| Garantía de un tiempo de operación continuo mayor a 4 horas.   |           |     |      |        |

Figura 25. Matriz de selección de concepto. Fuente: El autor.

### 9.1.2.2. *Desarrollo tarea dos: Evaluar los conceptos.*

La evaluación de conceptos es una evaluación del tipo relativa y por ende su naturaleza es subjetiva a la información conocida hasta ahora de cada uno de los conceptos en evaluación, la evaluación se hará indicado “mejor que” (+), “igual a” (0), o “peor que” (-) con relación al producto referencia para cada uno de los conceptos en evaluación, a continuación, se evidencia la evaluación realizada:

| CRITERIOS DE SELECCIÓN   | CONCEPTOS |     |      |        |
|--|-----------|-----|------|--------|
|  | Uno Ref.  | Dos | Tres | Cuatro |
| Facilidad de construcción con los recursos ya adquiridos por la empresa.   | 0         | 0   | 0    | +      |
| Costo de fabricación total menor a \$10000000.   | 0         | 0   | 0    | 0      |
| Facilidad de construcción con el recurso humano actual de la compañía.   | 0         | -   | -    | 0      |
| Facilidad para alimentación 24 VDC de los transmisores de presión en verificación.   | 0         | 0   | 0    | 0      |
| Complejidad baja de construcción.  | 0         | -   | -    | +      |
| Resuelve de manera eficiente los sub procesos críticos identificados.  | 0         | 0   | 0    | +      |
| Garantía de cumplimiento del tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro. | 0         | -   | -    | 0      |
| Garantía de cumplimiento del tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.       | 0         | 0   | 0    | +      |
| Facilidad en la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW para la construcción.      | 0         | 0   | 0    | 0      |
| Garantía de un número de conexiones para la los equipos necesarios para el proceso de verificación mayor a 2                 | 0         | 0   | 0    | 0      |
| En la búsqueda externa se evidencian productos similares que aporten credibilidad y respaldo al concepto.                    | 0         | -   | -    | +      |
| Garantía de un tiempo de operación continuo mayor a 4 horas.   | 0         | +   | 0    | +      |

Figura 26. Evaluación de conceptos. Fuente: El autor.

### 9.1.2.3. *Desarrollo tarea tres: Ordenar los conceptos.*

Se ordenan los conceptos sumando independiente mente los “mejor que” (+), y “peor que” (-), esto se aprecia en las filas siguientes a la evaluación de los conceptos, posteriormente se calcula la evaluación neta al restar el número de las “peor que” de las “mejor que”, un vez realizada la suma se aprecia e identifica el concepto que sobresale frente a los otros, en la tabla a continuación se puede apreciar el resultado:



| CRITERIOS DE SELECCIÓN   | CONCEPTOS |           |           |          |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
|  | Uno Ref.  | Dos       | Tres      | Cuatro   |
| Facilidad de construcción con los recursos ya adquiridos por la empresa.   | 0         | 0         | 0         | +        |
| Costo de fabricación total menor a \$10000000.   | 0         | 0         | 0         | 0        |
| Facilidad de construcción con el recurso humano actual de la compañía.   | 0         | -         | -         | 0        |
| Facilidad para alimentación 24 VDC de los transmisores de presión en verificación.   | 0         | 0         | 0         | 0        |
| Complejidad baja de construcción.  | 0         | -         | -         | +        |
| Resuelve de manera eficiente los sub procesos criticos identificados.  | 0         | 0         | 0         | +        |
| Garantía de cumplimiento del tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro. | 0         | -         | -         | 0        |
| Garantía de cumplimiento del tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.       | 0         | 0         | 0         | +        |
| Facilidad en la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW para la construcción.      | 0         | 0         | 0         | 0        |
| Garantía de un número de conexiones para la los equipos necesarios para el proceso de verificación mayor a 2                 | 0         | 0         | 0         | 0        |
| En la búsqueda externa se evidencian productos similares que aporten credibilidad y respaldo al concepto.                    | 0         | -         | -         | +        |
| Garantía de un tiempo de operación continuo mayor a 4 horas.   | 0         | +         | 0         | +        |
| <b>Suma +</b>  | <b>0</b>  | <b>1</b>  | <b>0</b>  | <b>6</b> |
| <b>Suma 0</b>  | <b>12</b> | <b>7</b>  | <b>8</b>  | <b>6</b> |
| <b>Suma -</b>  | <b>0</b>  | <b>4</b>  | <b>4</b>  | <b>0</b> |
| <b>Evaluación Neta</b>   | <b>0</b>  | <b>-3</b> | <b>-4</b> | <b>6</b> |
| <b>Posición</b>  | <b>2</b>  | <b>3</b>  | <b>4</b>  | <b>1</b> |

Figura 27. Matriz de evaluación de conceptos completada. Fuente: Propia.

#### 9.1.2.4. *Desarrollo tarea cuatro: Combinar y mejorar conceptos.*

Se determina que los conceptos no se pueden combinar o mejorar de una manera que represente un cambio relevante frente a la evaluación ya realizada.

#### 9.1.2.5. *Desarrollo tarea cinco: Seleccionar uno o más conceptos.*

Como resultado del desarrollo de la matriz de evaluación se evidencia claramente que el concepto cuatro :“A través del suministro del fluido pre comprimido y el control de la presión por medio de una válvula de aguja automatizada con servomotores de alto torque, se logra llegar a la presión objetivo”, sobresale como concepto dominante frente a los demás, con base a esto se determina que no es necesario realizar una análisis de selección de concepto más específico y se selecciona dicho concepto para continuar con las demás etapas

de desarrollo para el diseño del prototipo que cumpla con las especificaciones y necesidades del cliente previamente identificadas.

**9.1.2.6.        *Desarrollo tarea seis: Reflexionar sobre los resultados y el proceso.***

La evidente diferencia entre el concepto seleccionado y los demás se debe a que criterios como la información obtenida y el rendimiento ya comprobado de los productos existentes que trabajan con este concepto permiten cierto nivel de garantía con respecto al mismo, esto se aprecia claramente en la matriz de evaluación, adicionalmente la experiencia del evaluador permitió indicar que la construcción de este concepto sería más sencilla frente a los demás ya que el mismo resuelve de manera más eficiente los problemas planteados en los sub procesos críticos previamente identificados.

**9.1.3.    *Actividad dos: Definir teoría de funcionamiento del prototipo.***

Esta actividad consta de las siguientes tareas:

1. Crear un esquema del producto.
2. Agrupar los elementos del esquema en trozos.
3. Crear un diagrama aproximado del prototipo.

**9.1.4.    *Desarrollo actividad dos: Definir teoría de funcionamiento del prototipo.***

**9.1.4.1.        *Desarrollo tarea uno: Crear un esquema del producto.***

En la etapa anterior generación de conceptos se diseñó el diagrama de sub funciones del prototipo acorde con la necesidad y especificaciones de las partes interesadas, para el desarrollo de esta tarea teniendo definido el concepto a utilizar se utiliza el diagrama de sub funciones y se realiza un esquema que permite identificar los elementos constitutivos del prototipo tanto físicos como funcionales, las líneas verde representan la energía, las líneas negras la materia prima y las líneas azules punteadas representan el flujo de los datos.

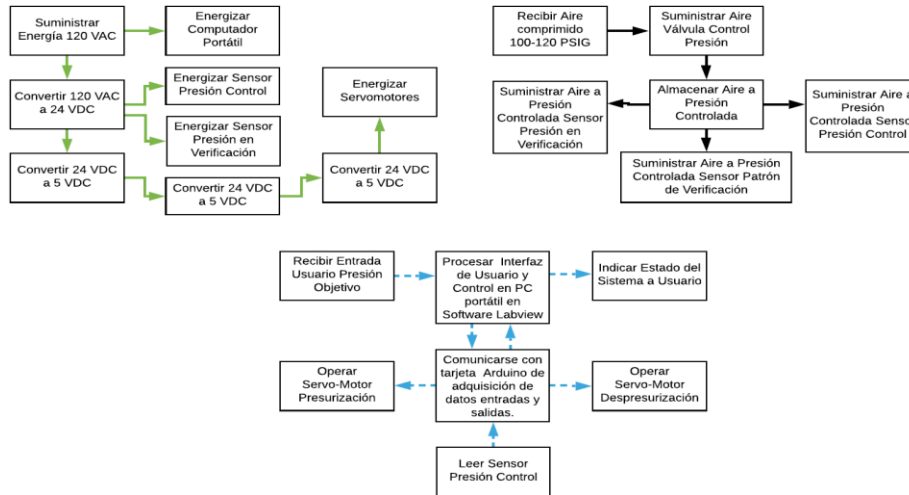


Figura 28. Esquema funcional del prototipo. Fuente: El autor.

**9.1.4.2. Desarrollo tarea dos: Agrupar los elementos del esquema en trozos.**

En el esquema funcional se diferencial claramente una división hasta ahora no marcada pero existente, la parte asociada a la energía se agrupa al trozo tablero eléctrico, la parte asociada a la materia prima en este caso el aire comprimido se agrupan un trozo llamado pulmón de aire y la parte asociada a las señales y datos se asocia a un trozo llamado indicación y control.

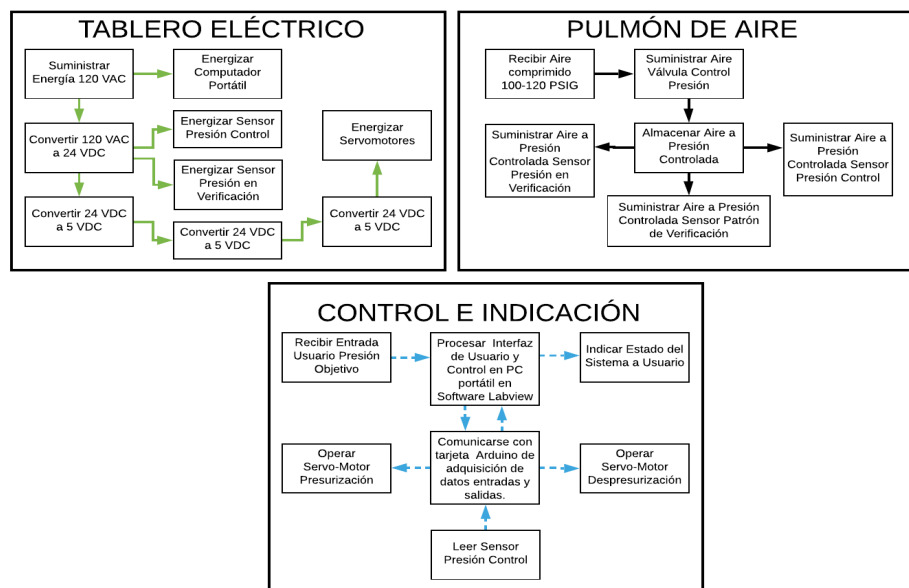


Figura 29. Esquema funcional del prototipo agrupado en trozos. Fuente: El autor.

### 9.1.4.3. Desarrollo tarea tres: Crear un diagrama aproximado del prototipo.

Con el objetivo de facilitar la construcción se crea un diagrama aproximado que permite considerar las interfaces entre los trozos e identificar recursos para la implementación y adecuación de los mismos, así como dar una idea más clara del prototipo a las partes interesadas. Así como en los diagramas anteriores las líneas verdes representan la energía, las líneas negras la materia prima y las líneas azules punteadas representan el flujo de los datos.

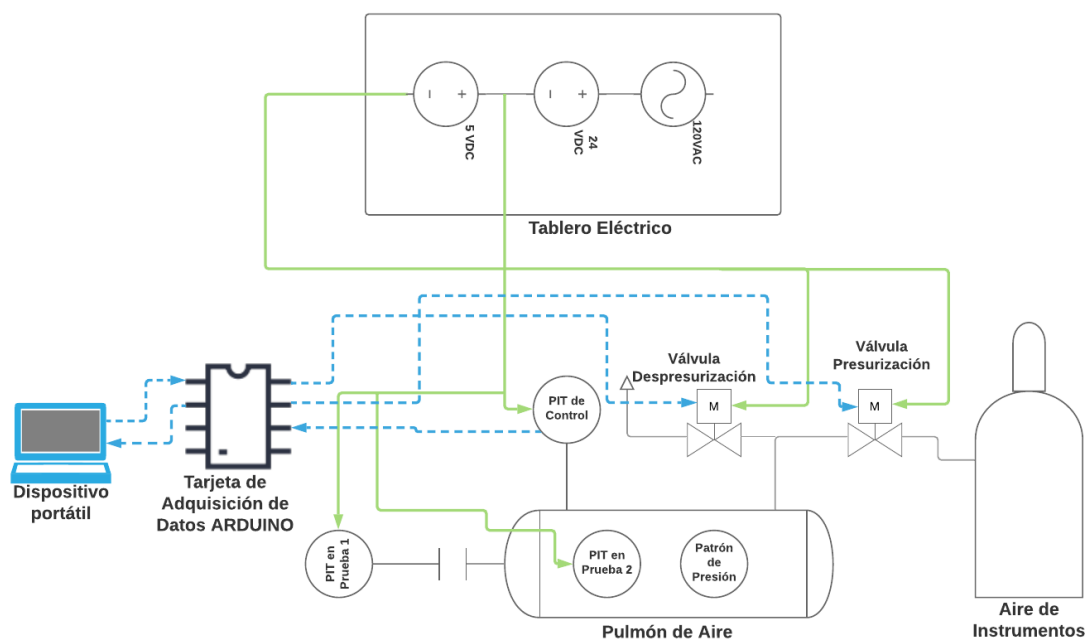


Figura 30. Diagrama aproximado prototipo. Fuente: El autor.

## 10. Construcción del prototipo

En la etapa anterior se seleccionó el concepto del prototipo del banco de presión a construir determinando la teoría de funcionamiento del mismo, en este capítulo, se evidenciará la construcción del del prototipo y la planeación de la misma, para el desarrollo de esta etapa se utiliza como base las recomendaciones en el libro Diseño y desarrollo de productos, “Capitulo 14 Construcción de Prototipos” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 285).

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Definir el tipo de prototipo a construir.
- Estructurar y planificar la construcción del prototipo.
- Registrar la construcción del prototipo del banco de presión.

Con la ejecución de esta etapa se da cumplimiento a los objetivos específicos:

- Diseñar de la estructura física necesaria para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo a la teoría de funcionamiento determinada.
- Diseñar el sistema de control necesario para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo a la teoría de funcionamiento determinada y las especificaciones y requisitos identificados.
- Diseñar la interfaz de operación y procesamiento para el funcionamiento del prototipo del banco de presión de acuerdo con las especificaciones y requisitos identificados.

### 10.1. Actividades y tareas

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan las siguientes actividades:

1. Definir el tipo de prototipo a construir.
2. Planear la construcción del prototipo.
3. Evidenciar la construcción del prototipo.

### **10.1.1. Actividad uno: Definir el tipo de prototipo a construir.**

Esta actividad consta de la siguiente tarea.

1. Determinar el tipo de prototipo a construir.

### **10.1.2. Desarrollo actividad uno: Definir el tipo de prototipo a construir.**

Según (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286) un prototipo se define como la aproximación al producto en una o más dimensiones de interés, esta definición permite la creación e identificación de varios tipos de prototipos, algunos de ellos pueden ser , “bosquejos de conceptos, modelos matemáticos, simulaciones, componentes de prueba y versiones completamente funcionales previas a la producción de un producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286), definir el tipo de prototipo que se construirá es fundamental para la planeación y construcción del mismo.

#### ***10.1.2.1. Desarrollo tarea uno: Determinar el tipo de prototipo a construir.***

El prototipó a construir debe permitir probar el concepto definido anteriormente así como medir y evaluar el cumplimiento de las especificaciones y requisitos de las partes interesadas en la construcción del mismo, esto se logra con un prototipo lo más cercano al producto final, es decir “una versión a plena escala y por completo operacional del producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287), según (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 287) el tipo de prototipo que cumple con esta definición es un prototipo físico-integral.

El prototipó físico-integral permite un aprendizaje eficiente sobre el cumplimiento de las especificaciones del prototipo del banco de presión, mejora la comunicación entre las partes interesadas en el desarrollo del mismo puesto que una representación visual y tangible es mucho más fácil de entender, analizar y probar, su construcción y cercana aproximación al producto final esperado permite una eficaz herramienta de integración de todas las partes que lo conforman permitiendo identificar a tiempo problemas presentes entre las mismas, por

ultimo permitirá cumplir el hito de funcionalidad al nivel deseado de cumplimiento de requisitos y especificaciones.

### **10.1.3. Actividad dos: Planear la construcción del prototipo.**

Un trabajo mal guiado en la construcción de prototipos lleva a una ejecución torpe y en algunos casos a no alcanzar los objetivos deseados con la construcción del prototipo, la correcta planeación de dicha construcción es la única manera de evitar que esto suceda.

Esta actividad consta de las siguientes tareas.

1. Definir el propósito del prototipo.
2. Establecer el nivel de aproximación del prototipo.
3. Bosquejar un plan experimental.
4. Crear un procedimiento ordenado para adquisición, construcción y prueba.

#### ***10.1.3.1. Desarrollo tarea uno: Definir el propósito del prototipo.***

El prototipo a construir como se especificó anterior mente es el HITO del proyecto y por ende su propósito es materializar el concepto de prototipo seleccionado en etapas anteriores del proyecto, permitiendo medir y evaluar el cumplimiento de las especificaciones y necesidades planteadas.

#### ***10.1.3.2. Desarrollo tarea: dos: Establecer el nivel de aproximación del prototipo.***

EL tipo de prototipo a construir es un prototipo físico-integral BETA el cual operara en el ambiente pretendido de uso, esto permite evaluar la confiabilidad, los defectos y posibles mejoras.

#### ***10.1.3.3. Desarrollo tarea tres: Bosquejar un plan experimental.***

Con el objetivo de comprobar el cumplimiento de las especificaciones de diseño del prototipo se bosqueja el siguiente plan experimental.

Tabla 15

*Bosquejo plan experimental.*

| Especificación a comprobar   | Experimento o prueba asociado   |
|--|---|
| Cantidad de dinero gastado en el proyecto.   | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.  |
| Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión.    |
| Voltaje de alimentación DC.  | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.  |
| Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación. | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.  |
| Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.               | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.  |
| Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión.    |
| Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar.  | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.  |
| Tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.                    | Prueba de estabilidad de la lectura de presión a distintas presiones a través del rango de operación del prototipo.     |
| Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varía o no.               | Prueba de estabilidad de la lectura de presión a distintas presiones a través del rango de operación del prototipo.     |
| Tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro.              | Prueba de velocidad de presurización y despresurización a diferentes puntos de presión a través del rango de operación. |



---

|  |  |
|--|--|
| El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW. | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.   |
| Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión. |
| Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión. |
| Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión  |
| Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.   | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión  |
| Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.  | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.   |
| Presión de aire de instrumentos disponible.  | Lista de chequeo tipo cuenta con: si o no.   |
| Tiempo de operación continuo del prototipo.  | Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión. |

---

Como se observa en la anterior tabla los experimentos bosquejados a realizar que permitirán evaluar y medir el cumplimiento de las especificaciones son:

- Lista de chequeo de cumplimiento tipo cuenta con: si o no.
- Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión.
- Prueba de velocidad de presurización y despresurización a diferentes puntos de presión a través del rango de operación.

- Prueba de estabilidad de la lectura de presión a distintas presiones a través del rango de operación del prototipo.

**10.1.3.4. Desarrollo tarea cuatro: Crear un procedimiento ordenado para adquisición, construcción y prueba.**

Con el fin de guiar de manera correcta la construcción del prototipo se realiza el siguiente procedimiento:

1. Alistamiento e identificación de materiales necesarios para cada uno de los trozos identificados precisamente en el bosquejo del prototipo.
2. Diseño y Construcción y/o ensamble del pulmón de aire.
3. Construcción del tablero eléctrico.
4. Automatización de la válvula de presurización y despresurización por medio de la integración con los servomotores.
5. Diseño de la Interfaz de control y operación HMI.
6. Diseño del sistema de control a nivel de software.
7. Integración de todos los componentes del prototipo.
8. Ejecución de pruebas experimentales.
9. Evaluación de resultados.

Se resume la planeación del prototipo en la siguiente forma o tabla:

Tabla 16

*Planeación del prototipo.*

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Nombre del prototipo  | Diseño prototipo banco de pruebas de presión para transmisores de presión.  |
| Propósito             | Materializar el concepto de prototipo seleccionado en etapas anteriores del proyecto, permitiendo medir y evaluar el cumplimiento de las especificaciones y necesidades planteadas. |
| Nivel de aproximación | Prototipo físico-integral BETA.   |

---

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Plan Experimental              | <p>Lista de chequeo de cumplimiento tipo cuenta con: si o no.</p> <p>Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión.</p> <p>Prueba de velocidad de presurización y despresurización a diferentes puntos de presión a través del rango de operación.</p> <p>Prueba de estabilidad de la lectura de presión a distintas presiones a través del rango de operación del prototipo.</p>  |
| Procedimiento de construcción. | <p>Alistamiento e identificación de materiales necesarios para cada uno de los trozos identificados precisamente en el bosquejo del prototipo.</p> <p>Diseño y Construcción y/o ensamble del pulmón de aire.</p> <p>Construcción del tablero eléctrico.</p> <p>Automatización de la válvula de presurización y despresurización por medio de la integración con los servomotores.</p> <p>Diseño de la Interfaz de control y operación HMI.</p> <p>Diseño del sistema de control a nivel de software.</p> <p>Integración de todos los componentes del prototipo.</p> <p>Ejecución de pruebas experimentales.</p> <p>Evaluación de resultados.</p> |

---

#### **10.1.4. Actividad dos: Evidenciar la construcción del prototipo.**

#### **10.1.5. Desarrollo actividad dos: Evidenciar la construcción del prototipo.**

Para la construcción del prototipo se sigue la planeación previamente planteada específicamente el procedimiento de construcción, el procedimiento se divide en los siguientes pasos o etapas:

1. Alistamiento e identificación de materiales necesarios para cada uno de los trozos identificados precisamente en el bosquejo del prototipo.
2. Diseño y Construcción y/o ensamble del pulmón de aire.
3. Construcción del tablero eléctrico.

4. Automatización de la válvula de presurización y despresurización por medio de la integración con los servomotores.
5. Diseño de la Interfaz de control y operación HMI.
6. Diseño del sistema de control a nivel de software.
7. Integración de todos los componentes del prototipo.

**10.1.5.1. Desarrollo etapa de construcción uno: Alistamiento e identificación de materiales necesarios para cada uno de los trozos identificados precisamente en el bosquejo del prototipo.**

Teniendo en cuenta el diagrama aproximado del prototipo y en revisión con los materiales disponibles en el almacén de HIDROCASANARE se identifican los siguientes equipos y materiales a usar:

Tabla 17

*Listado materiales disponibles construcción prototipo.*

| Ítem | Descripción  | Cantidad |
|------|--|----------|
| 1    | Coupling Hembra rosca NPT 1"X150.                            | 2        |
| 2    | Coupling Hembra rosca NPT 1/2"X150.                          | 3        |
| 3    | Tramo de tubería de 4" de diámetro 1 metro de largo SCH STD. | 1        |
| 4    | CAP soldado para tubería de 4" SCH STD.                      | 1        |
| 5    | Reducción soldada de 4" SCH STD a brida RF de 2"X150.        | 1        |
| 6    | Brida ciega RF de 2"X150.                                    | 1        |
| 7    | Juego de acoles rápidos conexión OD 1/4".                    | 2        |
| 8    | Bushin de 1" a 1/2".   | 2        |
| 9    | Racor de 1/2NPT a 3/8OD.                                     | 2        |
| 10   | Racor de 1/2NPT a 1/4OD.                                     | 1        |
| 11   | Tubing 3/8 en metros.  | 1        |
| 12   | Tubing 1/4 en metros.  | 1        |
| 13   | Tapón de 1/2".   | 2        |

---

|    |   |    |
|----|---|----|
| 14 | Niple acero al carbón de ½ tipo tambor.                           | 2  |
| 15 | Codo 90° acero al carbón 1/2" NPT Hembra.                         | 1  |
| 16 | Válvula tipo Manifold bloqueo y purga marca YOKOGAMA 1/2".        | 1  |
| 17 | Unión de 1/2" NPT.  | 1  |
| 18 | Transmisor de presión marca ROSEMOUNT modelo 3051CD3A.            | 1  |
| 19 | Fuente 24 VDC Phoenix Contac.                                     | 1  |
| 20 | Fuente DC/DC 24V a 5V.  | 1  |
| 21 | Lamina para tablero eléctrico m <sup>2</sup> .                    | 1  |
| 22 | Riel Omega para tablero electrico metros.                         | 2  |
| 23 | Breaker monopolar para riel Omega.                                | 1  |
| 24 | Porta fusible tipo bayoneta para riel Omega.                      | 6  |
| 25 | Fusible 4 Amp.  | 2  |
| 26 | Fusible 100 mA.   | 4  |
| 27 | Bornera Riel Omega.   | 24 |
| 28 | Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA.                               | 1  |
| 29 | SHILD borneras para Arduino MEGA.                                 | 1  |
| 30 | Computador Portátil con W10 y software LabVIEW.                   | 1  |
| 31 | Cable encauchetado 3x14 mts                                       | 2  |
| 32 | Conexión eléctrica Macho 120 VAC                                  | 1  |
| 33 | Cable blanco para tablero eléctrico multifilar 16 AWG por metros. | 5  |
| 34 | Cable negro para tablero eléctrico multifilar 16 AWG por metros.  | 5  |
| 35 | Servo motor marca PowerHD modelo 1501MG                           | 2  |
| 36 | Regulador de aire de 0 a 150 PSIG.                                | 1  |

---

**10.1.5.2.      *Desarrollo etapa de construcción dos: Diseño y construcción y/o ensamble del pulmón de aire.***

El pulmón de aire se diseña teniendo en cuenta las especificaciones y necesidades de las partes interesadas, como resultado el diseño y construcción del pulmón de aire debe cumplir con los siguientes criterios:

- El número de conexiones de equipos en verificación debe ser mayor o igual a 2.
- La altura entre los equipos de verificación debe ser cero.
- Se deben usar, en lo posible, recursos propios ya adquiridos por la compañía y que se encuentren en el almacén.

El diseño del pulmón de aire propuesto en el diagrama aproximado del prototipo figura 12, permite el cumplimiento de los 3 criterios anteriores, sin embargo, al construir el pulmón de aire se tuvo en cuenta que cuando los equipos de verificación y a verificar estuvieran instalados no se estorben entre sí, con base a estos criterios se construye el pulmón de aire, a continuación, se evidencia registro fotográfico de la construcción del mismo:



*Figura 31. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico uno. Fuente: El autor.*



*Figura 32. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico dos. Fuente: El autor.*



*Figura 33. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico tres. Fuente: El autor.*



*Figura 34. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico cuatro. Fuente: El autor.*



*Figura 35. Construcción pulmón de aire, registro fotográfico cinco. Fuente: El autor.*

#### **10.1.5.3. Desarrollo etapa de construcción tres: Construcción del tablero eléctrico.**

El tablero eléctrico se diseña y construye teniendo en cuenta las especificaciones y necesidades de las partes interesadas, como resultado el diseño y construcción del tablero eléctrico debe cumplir con los siguientes criterios:

- Alimentación eléctrica a 120 VAC.

- Suministrar alimentación eléctrica a 24 VDC para alimentar el transmisor de presión de control y el o los transmisores de presión en verificación.
- Suministrar alimentación eléctrica a 5VDC para alimentar los servos que contralaran la válvula que permitirá el control de la presión.

Adicionalmente en el proceso se evidencia factible la integración de la tarjeta Arduino al tablero eléctrico facilitando las conexiones con los sensores y los servomotores, a continuación, se evidencia registro fotográfico de la construcción del mismo:



*Figura 36. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico uno. Fuente: El autor.*



*Figura 37. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico dos. Fuente: El autor.*



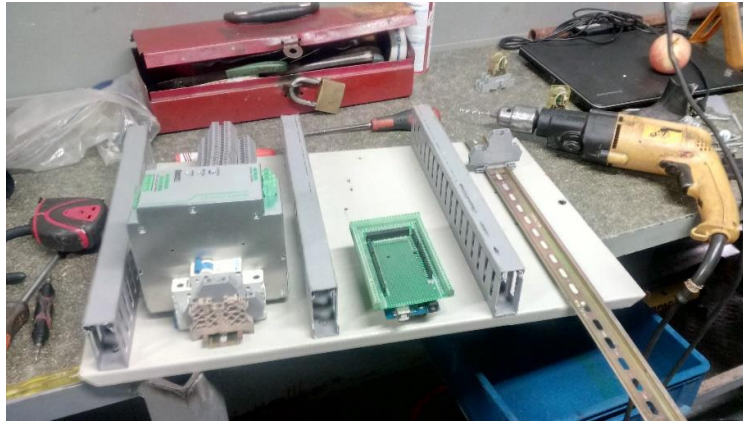


Figura 38. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico tres. Fuente: El autor.

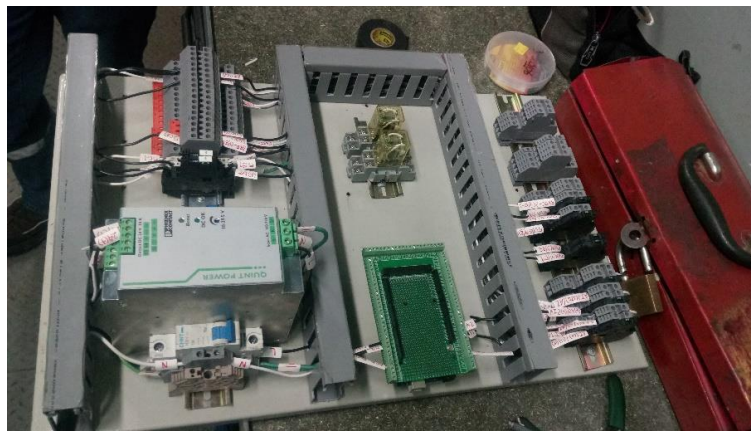


Figura 39. Construcción tablero eléctrico, registro fotográfico uno. Fuente: El autor.

#### **10.1.5.4. Desarrollo etapa de construcción cuatro: Automatización de la válvula de presurización y despresurización por medio de la integración con los servomotores.**

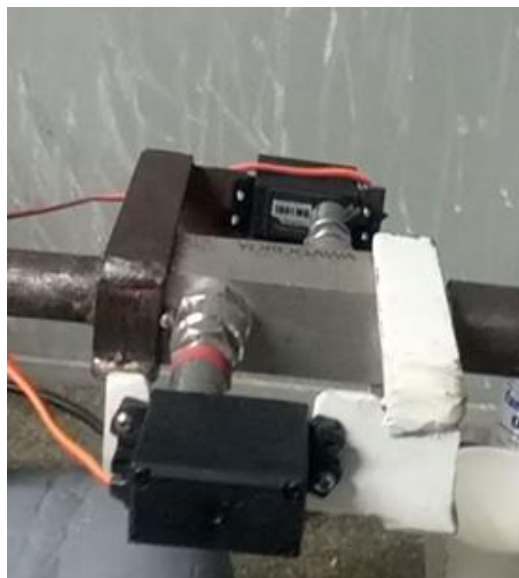
Se logra la automatización de la válvula de control integrándola con dos servomotores uno en la válvula de bloqueo y otro en la válvula de purga de esta manera uno permite la entrada de aire al pulmón y el otro la despresurización del mismo, esto se logró construyendo un acople mecánico conocido en el sector como manzana el cual acola el vástago de la válvula con los sistemas dentados del servomotor y en este caso a través de pines de sujeción se logra la integración servomotor válvula, adicionalmente se fabrica soporte sujeto al cuerpo de la válvula que garantiza el giro del vástago de la válvula y no del servomotor sobre el vástago, a continuación se evidencia registro fotográfico de esta etapa:



*Figura 40. Automatización válvula presurización y despresurización, registro fotográfico uno. Fuente: El autor.*



*Figura 41. Automatización válvula presurización y despresurización, registro fotográfico dos. Fuente: El autor.*



*Figura 42. Automatización válvula presurización y despresurización, registro fotográfico tres. Fuente: El autor.*

### 10.1.5.5. *Desarrollo etapa de construcción cinco: diseño de la interfaz de control y operación HMI.*

La interfaz de control y operación según los requerimientos de las partes interesadas se desarrolla en el software LabVIEW versión 2017, a continuación, se muestra el panel frontal del LabVIEW el cual es la interfaz entre el operador y el control del prototipo.

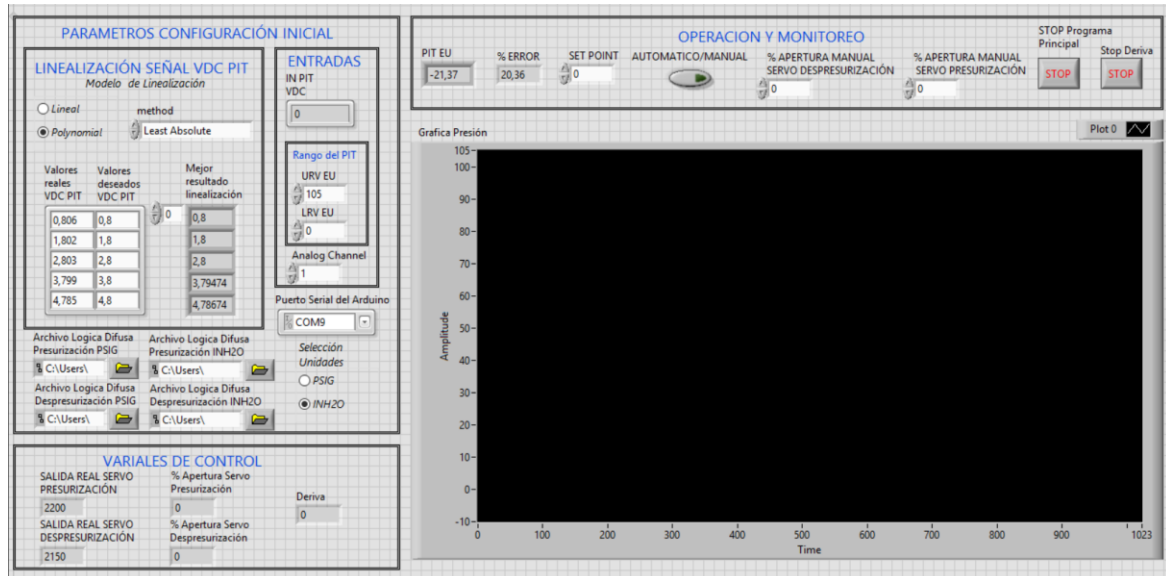


Figura 43. Panel frontal. Fuente: El autor.

El panel control está dividido en tres partes, a continuación, se describe cada una de ellas:

- **Parámetros de configuración inicial:** En esta sección se realizan las configuraciones iniciales antes de iniciar a operar el prototipo del banco de presión, entre ellas esta:
  - Linealización señal VDC PIT: Permite linealizar la señal análoga 4 a 20 mA recibida del PIT de control, esta señal se convierte en una señal de 1 a 5 VDC y posteriormente es linealizada a través de un método que puede ser lineal o polinomial, el operador puede ver cuál es el mejor resultado.
  - Entradas: El operador puede determinar la entrada análoga del Arduino a la cual estará conectada el transmisor de presión de control y el rango al cual está configurado el mismo, así como ver el valor de voltaje real con el cual

alimentar la tabla de linealización, adicionalmente escogerá el puerto serial al cual está conectado el Arduino y seleccionara las unidades con las que va a trabajar si son PSIG o INH2O.

- Archivos de lógica difusa: El operador carga cada uno de los archivos de lógica difusa para un total de cuatro, dos para presurización y despresurización en unidades de PSIG y otros dos para presurización y despresurización en unidades de INH2O.

| Valores reales VDC PIT | Valores deseados VDC PIT | Mejor resultado linealización |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 0,806                  | 0,8                      | 0,8                           |
| 1,802                  | 1,8                      | 1,8                           |
| 2,803                  | 2,8                      | 2,8                           |
| 3,799                  | 3,8                      | 3,79474                       |
| 4,785                  | 4,8                      | 4,78674                       |

Figura 44. Panel frontal: Parámetros de configuración inicial. Fuente: El autor.

- **VARIABLES DE CONTROL:** Esta sección permite al operario experto o al diseñador evaluar el comportamiento del sistema, en esta sección se encuentra la salida real del control a cada uno de los servos, el porcentaje de apertura del servo y la deriva de la presión, estos valores permiten determinar el estado de los servos, la velocidad de

presurización y realizar un análisis puntual sobre la eficiencia del archivo de lógica Fuzzy cargado.

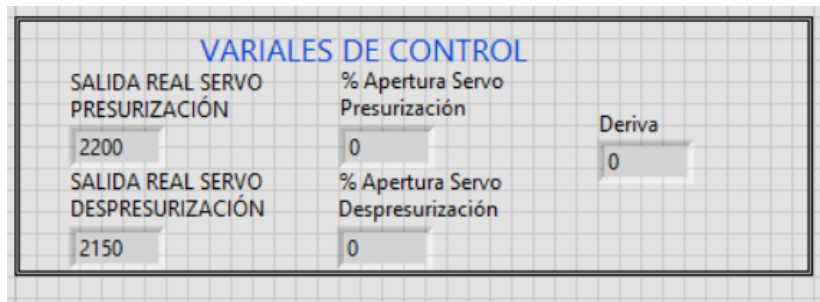


Figura 45. Panel frontal: Variables de control. Fuente: El autor.

- Operación y monitoreo:** Esta sección permite al operador observar la presión en el pulmón de aire, ver el % de error entre el set-point fijado y el valor real, permite definir el control manual o automático de los servos, el control manual permite hacer una prueba inicial de la correcta operación de los servos entre otras cosas, adicionalmente se tiene una gráfica de la presión versus el tiempo la cual facilita al operador ver el comportamiento del sistema y definir cuando es o no estable la presión en el pulmón de aire.

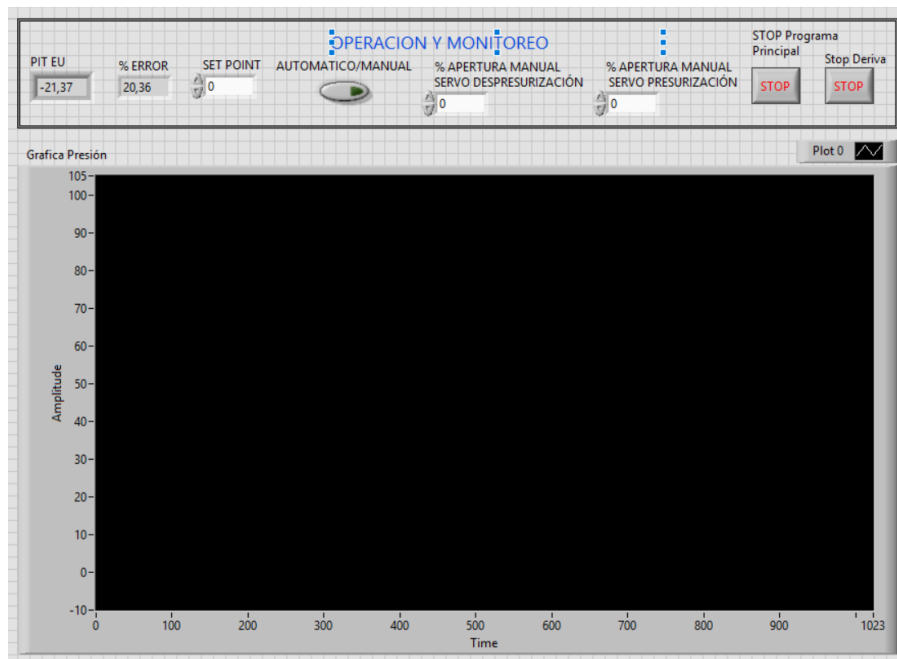


Figura 46. Panel frontal: Operación y monitoreo. Fuente: El autor.

En la siguiente imagen se aprecia un panorama general del diagrama de bloques de LabVIEW, el diagrama de bloques es donde se realiza y ejecuta toda la interfaz de procesamiento y operación

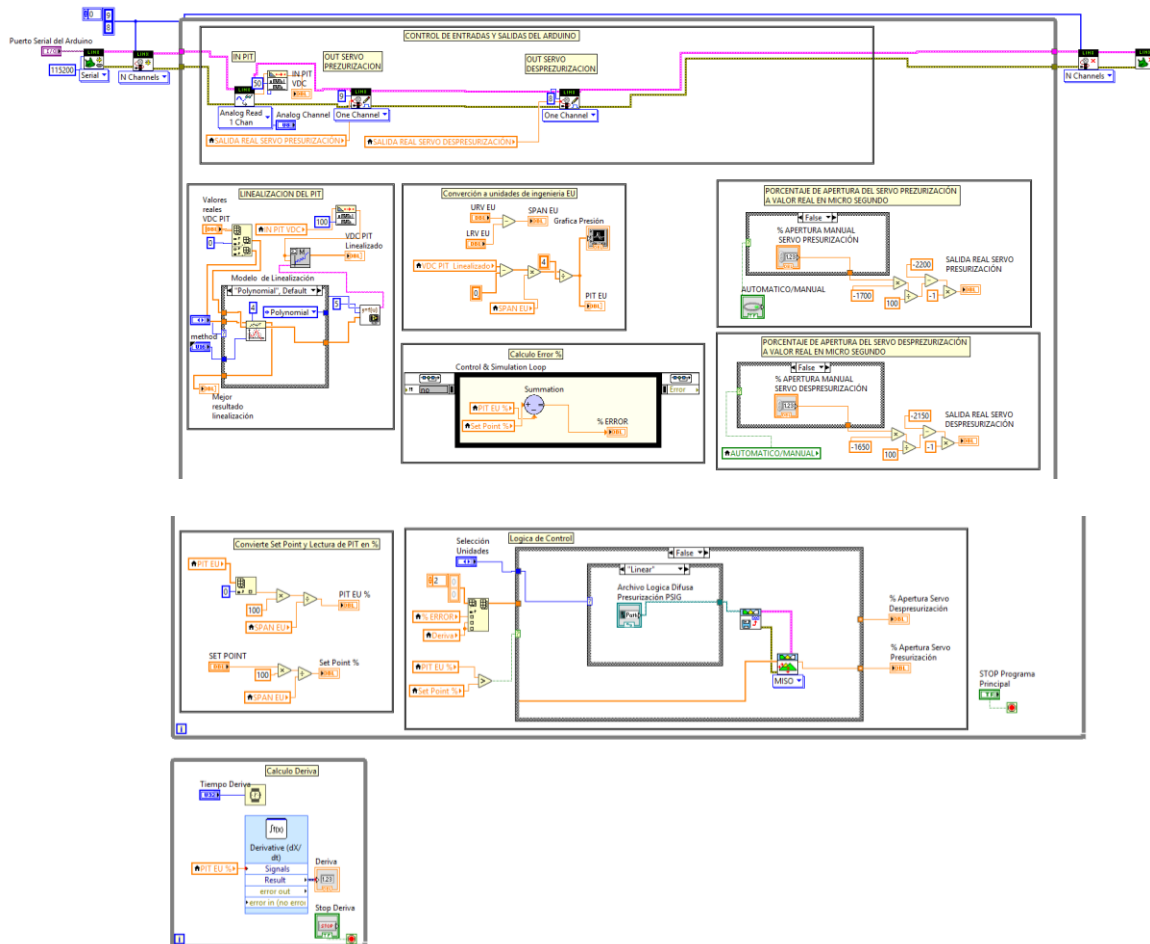


Figura 47. Diagrama de bloques general. Fuente: El autor.

El Diagrama de bloques está dividido en ocho partes o secciones, a continuación, se describe cada una de ellas:

- Control de entradas y salidas del Arduino:** En esta sección se realiza la configuración de las entradas, salidas, comunicación y configuración inicial del Arduino, para ello se utiliza el Tools de LabVIEW “LINX”, el cual cuenta con bloques predefinidos para la lectura de la entrada análoga, la configuración del puerto serial de comunicaciones y la configuración para las dos salidas de los servomotores.

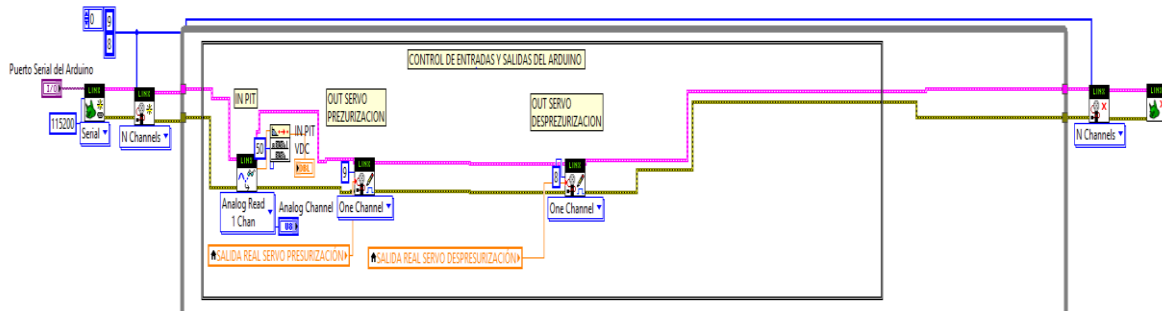


Figura 48. Diagrama de bloques: Control de entradas y salidas del Arduino. Fuente: El autor.

- Linealización del PIT:** Esta sección recibe la lectura en VDC de la entrada análoga del Arduino, recibe los valores reales en VDC para 5 puntos distribuidos a través del rango de medición del PIT, recibe los valores esperados después de linealizar, recibe el método de linealización a utilizar, realiza la linealización y entrega el VDC linealizado correspondiente a la lectura del PIT de control.

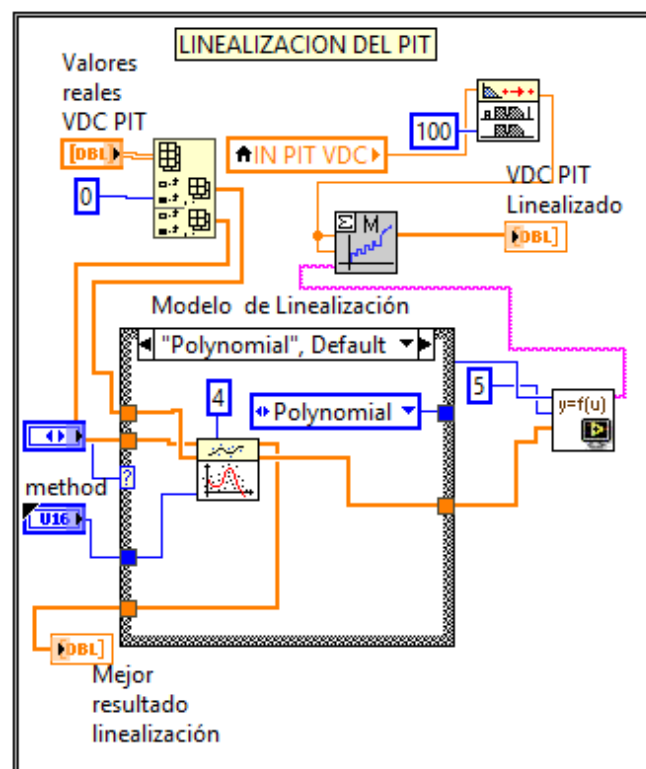


Figura 49. Diagrama de bloques: Linealización del PIT. Fuente: El autor

- Conversión de unidades de ingeniería EU:** Esta sección recibe el voltaje linealizado de la sección linealización del PIT, recibe el rango configurado en el PIT de control



y entrega la lectura de presión en las unidades de ingeniería seleccionadas, a su vez registra en la gráfica de presión versus tiempo los valores de lectura del PIT de control.

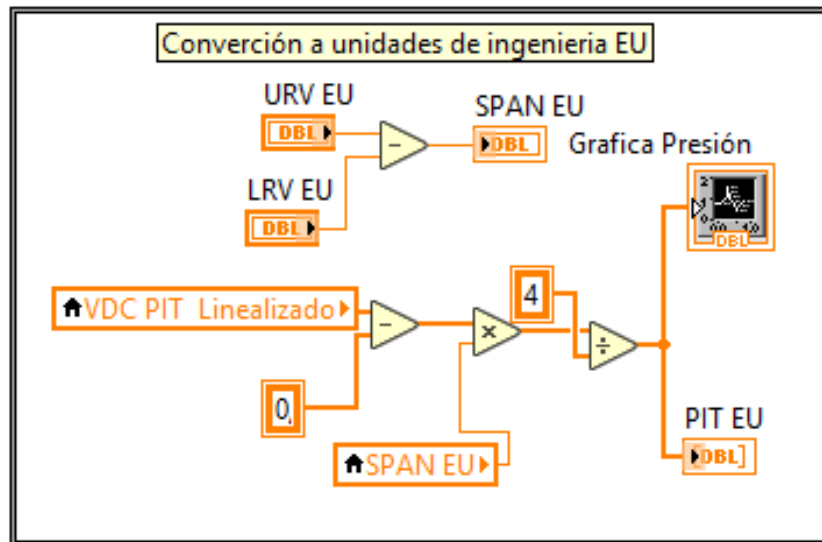


Figura 50. Diagrama de bloques: Conversión de unidades de ingeniería EU. Fuente: El autor.

- **Convertir set-point en %:** Esta sección toma la lectura del PIT y el set-point objetivo en unidades de ingeniería y las convierte en % del span, esto con el objetivo de facilitar cálculos posteriores.

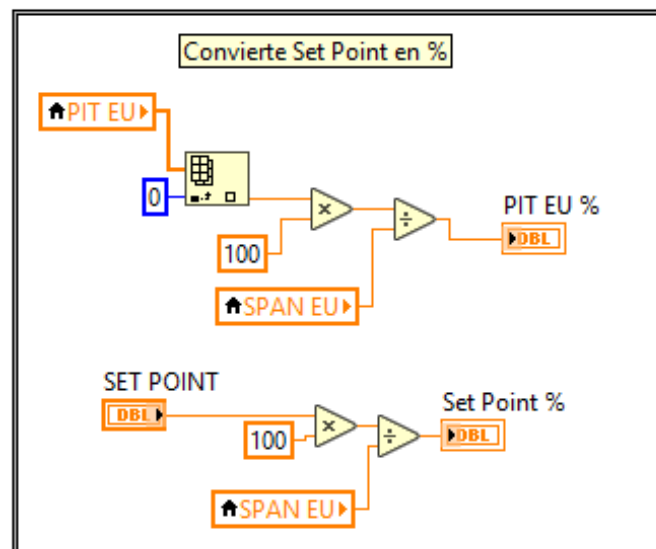


Figura 51. Diagrama de bloques: Conversión de set-point en % de span. Fuente: El autor.



- **Cálculo del error %:** En esta sección se calcula en tiempo real el % de error al restar la lectura del PIT de control menos el valor de set-point objetivo.

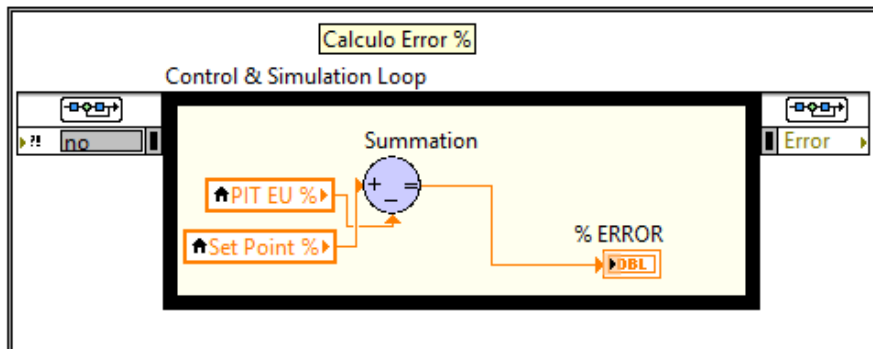


Figura 52. Diagrama de bloques: Cálculo del error %. Fuente: El autor

- **Cálculo de la deriva:** En esta sección se calcula la deriva de la lectura de la presión en otras palabras se calcula la velocidad de presurización del pulmón de aire, esta sección está en un bloque WHILE diferente al de programa principal con el objeto de manejar tiempos de ejecución independientes y que la ejecución de un bloque no afecte la del otro.

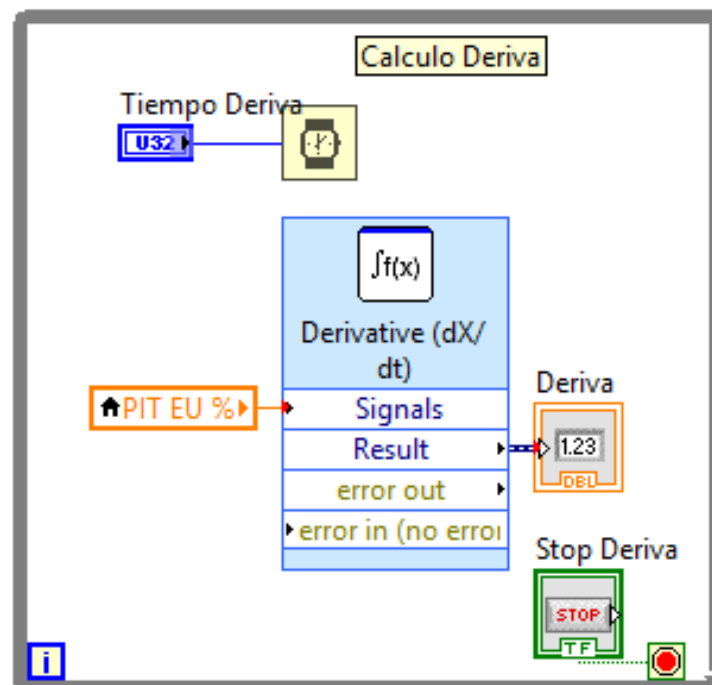


Figura 53. Diagrama de bloques: Cálculo de la deriva. Fuente: El autor.

- Lógica de control:** Esta sección es la más importante de todo el proceso, en ella llegan las variables y datos procesados hasta ahora como entradas y salen los comandos de control para cada uno de los servomotores, a través de la implementación del control de lógica difusa, teniendo como entradas el porcentaje de error, la deriva de la presión, la lectura del PIT en unidades de ingeniería, el set-point en unidades de ingeniería y las unidades a utilizar se define si se controla la presurización o despresurización, si se utiliza el archivo de lógica difusa para pulgadas de agua INH<sub>2</sub>O o para PSIG, con base a esto se define que servo opera si el despresurización o el de presurización y a qué porcentaje de apertura de la válvula.

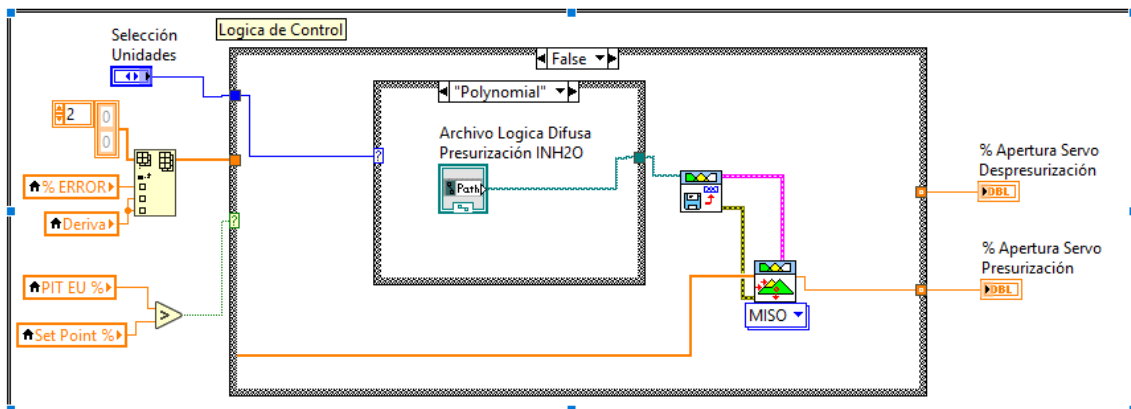


Figura 54. Diagrama de bloques: Lógica de control. Fuente: El autor.

- Porcentaje de apertura del servo de presurización o despresurización a valor real en microsegundos:
- En esta sección se recibe el porcentaje de apertura para cada uno de los servos determinado por la lógica de control o manualmente, se define si el servo está en automático o manual, el valor de porcentaje de apertura se convierte a microsegundos ya que esta variable es la que el toolbox de LINX interpreta para operar los servomotores a través del Arduino.

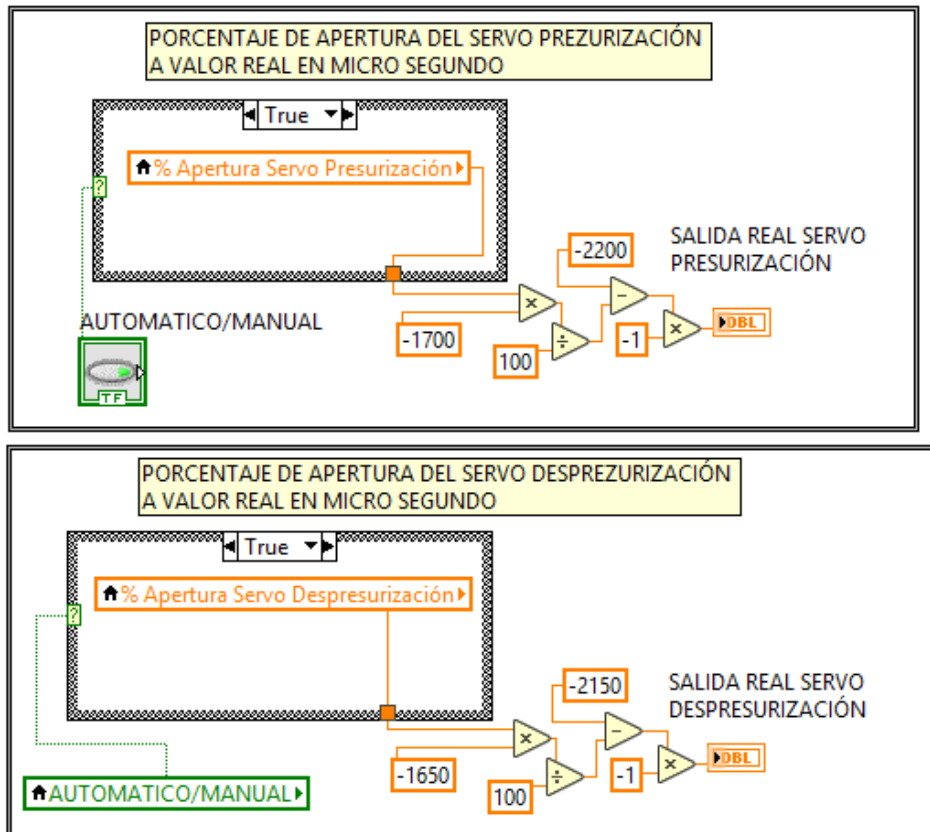


Figura 55. Diagrama de bloques: Porcentaje de apertura servos a valor real en microsegundos. Fuente: El autor.

#### 10.1.5.6. Desarrollo Etapa de Construcción seis: Diseño del sistema de control a nivel de software

En esta etapa se trata a detalle la lógica de control del prototipo considerándose esta el corazón del mismo y en este punto, la que definirá si las especificaciones y requisitos se cumplen o no.

La lógica de control implementada fue lógica difusa, según (Ponce Cruz, 2010, pág. 36) es motivado por el deseo satisfacer uno o más de los siguientes objetivos:

1. Mejorar la robustez que se obtiene con los métodos clásicos de control lineales.
2. Diseño de control simplificado para modelos complejos.
3. También se obtiene una implementación simplificada.
4. Autonomía.

5. Adaptabilidad.

6. En el caso del control difuso, no es necesario un modelo matemático de la planta.

Por otro lado, el mismo autor cita “La esencia del control difuso es que convierte la estrategia de control lingüístico, la cual se basa en el conocimiento de un experto, en una estrategia de control automático” (Ponce Cruz, 2010, pág. 36), con base a esta afirmación se realizó un reconocimiento a profundidad del comportamiento del sistema de control conformado por el pulmón de aire, el transmisor de presión de control y la válvula automatizada para la presurización y despresurización del sistema con el objetivo de poder definir más adelante lo que sería el proceso de diseño del control difuso.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques para desarrollar la metodología de la lógica difusa

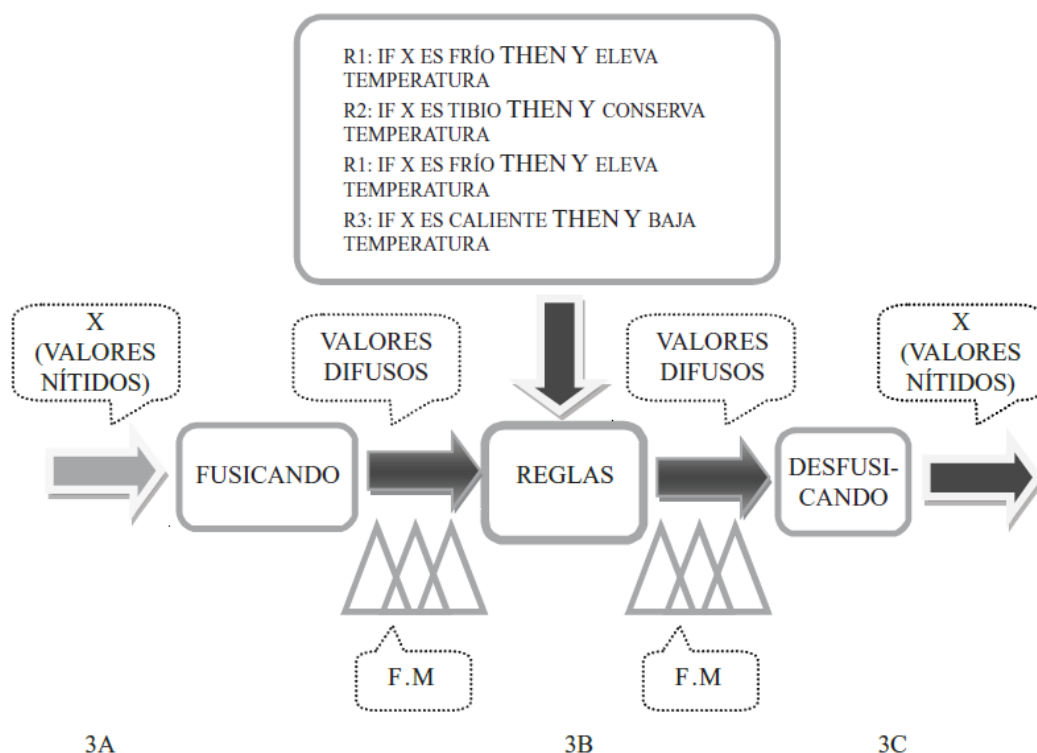


Figura 56. Diagrama de bloques para desarrollar metodología de la lógica difusa, tomado de: (Ponce Cruz, 2010, pág. 6).

La implementación de la lógica difusa de control utilizada en el prototipo del banco de presión se lleva a cabo en el TOOLS de LabVIEW “Fuzzy System Designer” siguiendo lo indicado en el diagrama de la figura 19 y siguiendo el ejemplo planteado por (Ponce Cruz, 2010, pág. 86) para la automatización de un cultivo hidropónico de vegetales.

1. Se realiza la identificación de variables de entradas y salidas del controlador

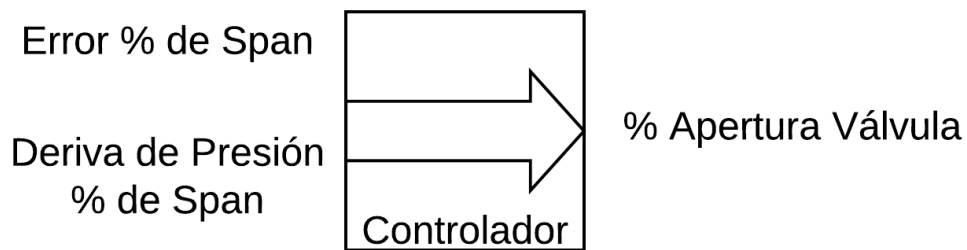


Figura 57. Entradas y salidas del controlador. Fuente: El autor.

2. Se realiza la fusificación de las entradas y salidas a través de la definición de las funciones de membresía

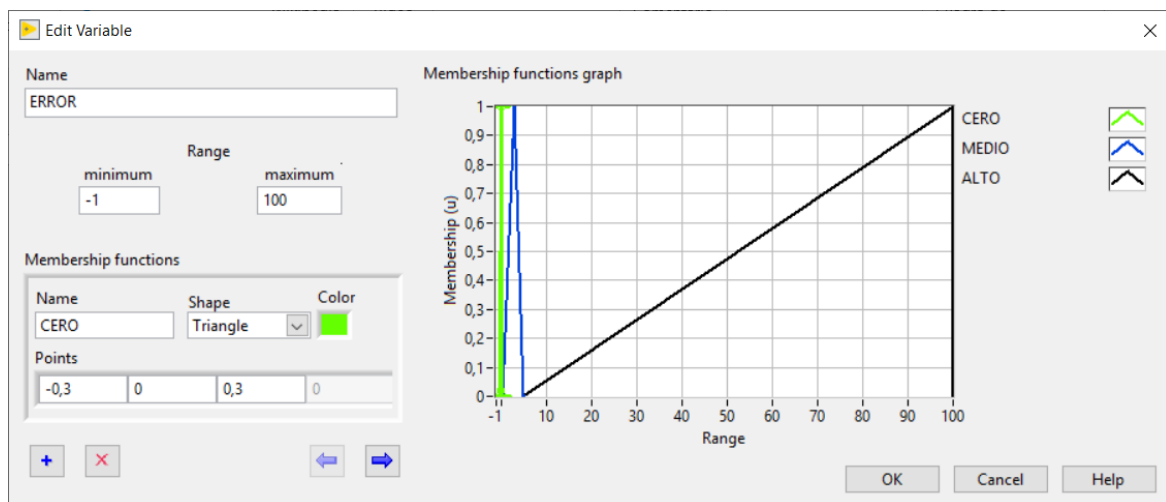


Figura 58. Función de membresía error en % de span. Fuente: El autor.

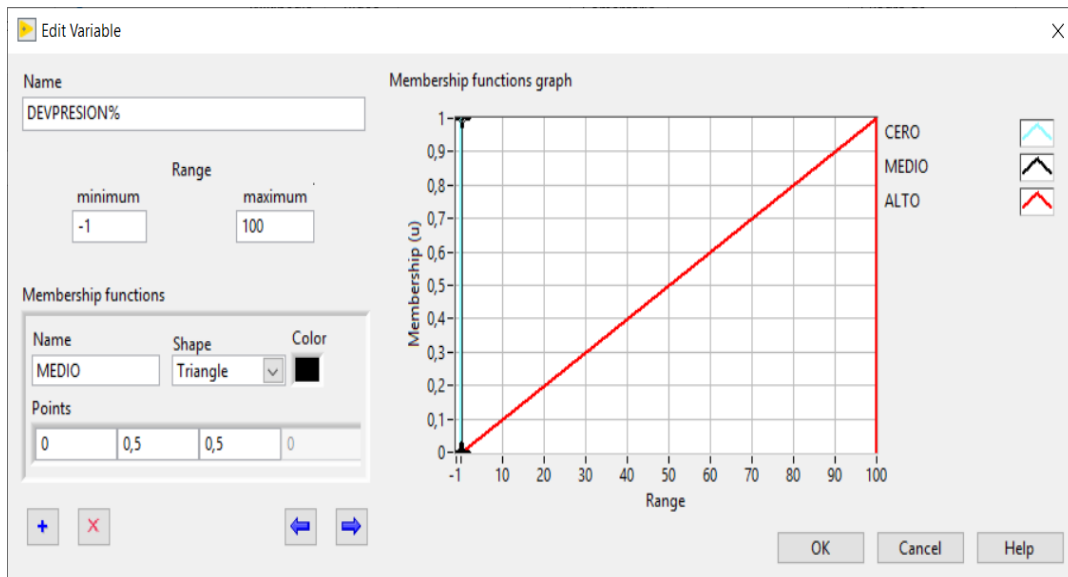


Figura 59. Función de membresía deriva de presión en % span. Fuente: El autor.

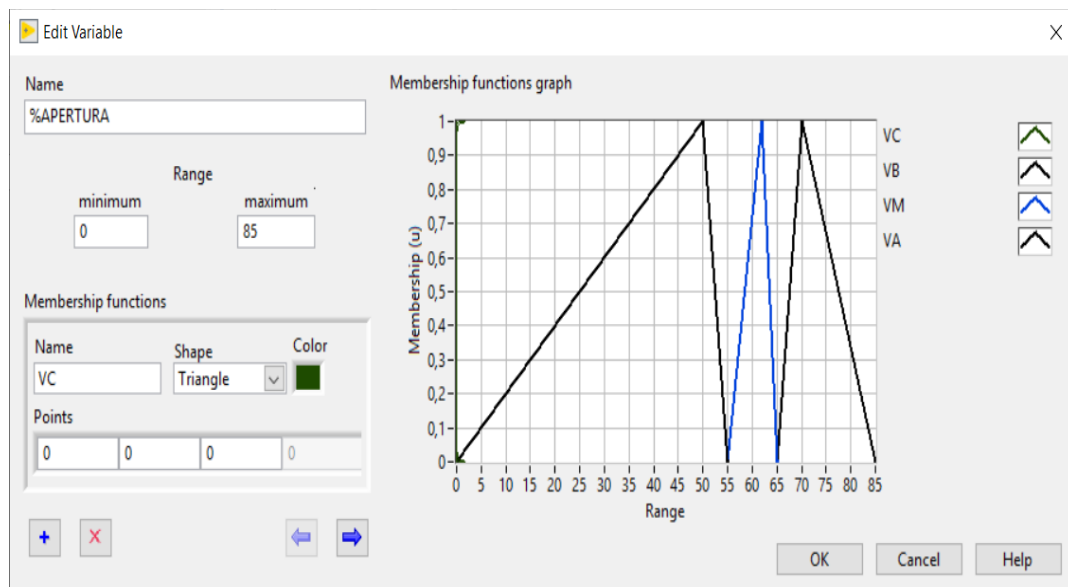


Figura 60. Función de membresía % apertura válvula. Fuente: El autor.

3. Diseño de la matriz de reglas difusas para relacionar las variables de entrada con la variable de salida.

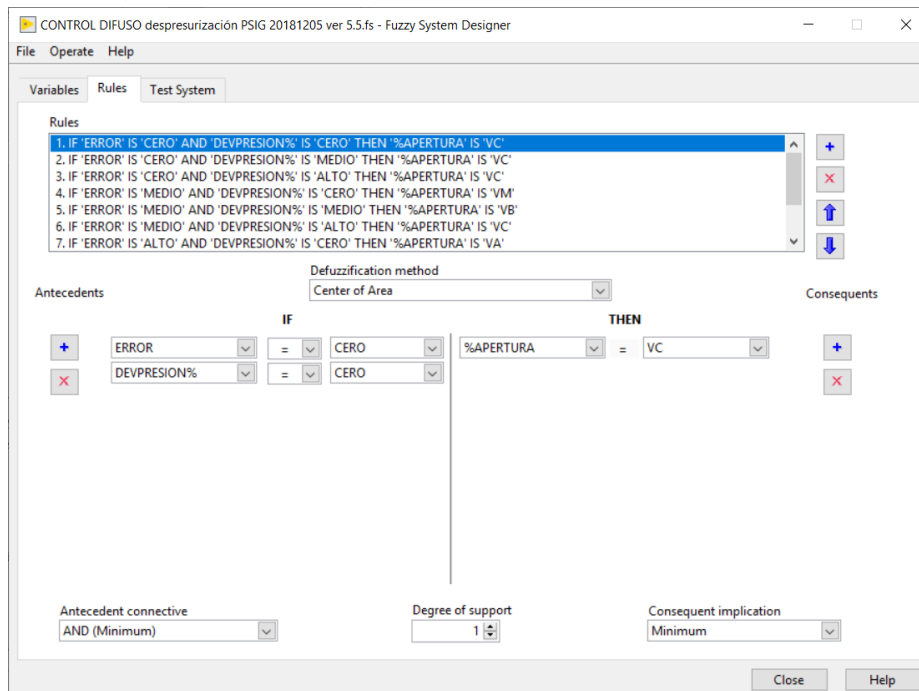


Figura 61. Matriz de reglas difusas. Fuente: El autor.

4. Selección del método de desfuzzificación como se observa en la figura 34 el método seleccionado fue centro de área.
5. Evaluación del control difuso por medio del “Test System” del TOOLS de LabVIEW “Fuzzy System Designer”.

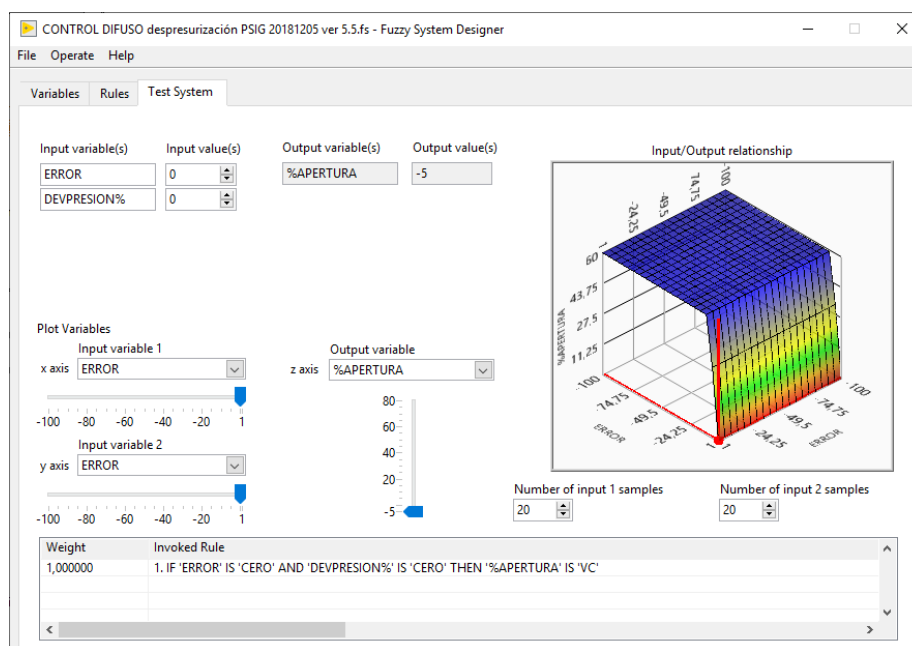


Figura 62. "Test System" del TOOLS de LabVIEW "Fuzzy System Designer". Fuente: El autor.

El proceso de utilización del Tools de LabVIEW del TOOLS de LabVIEW “Fuzzy System Designer” genera un archivo de lógica difusa el cual es después cargado al diagrama de bloques correspondiente como se puede observar en las figuras 27 y 17 respectivamente, ara el prototipo del banco de presión se generaron cuatro archivos: archivo uno para controlar la presurización en unidades de PSIG, archivo dos para controlar la despresurización en unidades de PSIG, archivo tres para controlar la presurización en unidades de INH2O y archivo cuatro para controlar la despresurización en unidades de INH2O, a continuación se presentan las funciones de membresía y las reglas para cada uno de estos archivos.

Tabla 18

*Funciones de membresía y reglas archivo uno presurización en unidades de PSIG.*

| Variable   | nombre Función | Puntos |       |       |
|--|----------------|--------|-------|-------|
| %Error   | Cero           | -0.3   | 0.0   | 0.3   |
|  | Medio          | 0.3    | 3.0   | 5.0   |
|  | Alto           | 5.0    | 100.0 | 100.0 |
| Devpresion%  | Cero           | 0.0    | 0.0   | 0.0   |
|  | Medio          | 0.0    | 0.5   | 0.5   |
|  | Alto           | 0.5    | 100.0 | 100.0 |
| %Apertura  | VC             | 0.0    | 0.0   | 0.0   |
|  | VB             | 0.0    | 50.0  | 55.0  |
|  | VM             | 55.0   | 62.0  | 65.0  |
|  | VA             | 65.0   | 70.0  | 85.0  |
| Reglas   |                |        |       |       |
| 1. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VC”.   |                |        |       |       |
| 2. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VC”.  |                |        |       |       |
| 3. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.   |                |        |       |       |
| 4. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VM”.  |                |        |       |       |
| 5. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VB”. |                |        |       |       |
| 6. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.  |                |        |       |       |



- 
7. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VA”.
8. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VA”.
9. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.
- 

Tabla 19

*Funciones de membresía y reglas archivo dos despresurización en unidades de Psig.*

| Variable   | nombre Función | Puntos |        |       |
|--|----------------|--------|--------|-------|
| %Error   | Cero           | -0.3   | 0.0    | 0.3   |
|  | Medio          | -5.0   | -5.0   | -0.3  |
|  | Alto           | -100.0 | -100.0 | -5.0  |
| Devpresion%  | Cero           | 0.0    | 0.0    | 0.0   |
|  | Medio          | -0.75  | -0.75  | 0.0   |
|  | Alto           | -100.0 | -100   | -0.75 |
| %Apertura  | VC             | -5.0   | -5.0   | -5.0  |
|  | VB             | -5.0   | 10.0   | 25.0  |
|  | VM             | 25.0   | 33.0   | 38.0  |
|  | VA             | 38.0   | 60.0   | 80.0  |
| Reglas   |                |        |        |       |
| 1. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VC”.   |                |        |        |       |
| 2. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VC”.  |                |        |        |       |
| 3. si “%Error” es “Cero” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.   |                |        |        |       |
| 4. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VM”.  |                |        |        |       |
| 5. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VB”. |                |        |        |       |
| 6. si “%Error” es “Medio” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.  |                |        |        |       |
| 7. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Cero” entonces “%Apertura” es “VA”.   |                |        |        |       |
| 8. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Medio” entonces “%Apertura” es “VA”.  |                |        |        |       |
| 9. si “%Error” es “Alto” Y “Devpresion%” es “Alto” entonces “%Apertura” es “VC”.   |                |        |        |       |

---

Tabla 20

*Funciones de membresía y reglas archivo tres presurizaciones en unidades de INH2O.*

| Variable   | nombre Función | Puntos |       |       |
|--|----------------|--------|-------|-------|
| %Error   | Cero           | -0.5   | 0.0   | 0.5   |
|  | Medio          | 0.5    | 3.0   | 5.0   |
|  | Alto           | 5.0    | 100.0 | 100.0 |
| Devpresion%  | Cero           | 0.0    | 0.0   | 0.0   |
|  | Medio          | 0.0    | 0.5   | 0.5   |
|  | Alto           | 0.5    | 100.0 | 100.0 |
| %Apertura  | VC             | 0.0    | 0.0   | 0.0   |
|  | VB             | 0.0    | 38.0  | 55.0  |
|  | VM             | 55.0   | 60.0  | 65.0  |
|  | VA             | 65.0   | 71.0  | 81.0  |
| Reglas   |                |        |       |       |
| 1. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VC".   |                |        |       |       |
| 2. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VC".  |                |        |       |       |
| 3. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".   |                |        |       |       |
| 4. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VM".  |                |        |       |       |
| 5. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VB". |                |        |       |       |
| 6. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".  |                |        |       |       |
| 7. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VA".   |                |        |       |       |
| 8. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VA".  |                |        |       |       |
| 9. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".   |                |        |       |       |

Tabla 21

*Funciones de membresía y reglas archivo cuatro despresurizaciones en unidades de INH2O.*

| Variable | nombre Función | Puntos |      |      |
|----------|----------------|--------|------|------|
| %Error   | Cero           | -0.5   | 0.0  | 0.5  |
|          | Medio          | -8.0   | -8.0 | -0.5 |

|  |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
|  | Alto  | -100  | -100  | -8    |
| Devpresion%  | Cero  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
|  | Medio | -0.75 | -0.75 | 0.0   |
|  | Alto  | -100  | -100  | -0.75 |
| %Apertura  | VC    | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
|  | VB    | 0.0   | 20.0  | 28.0  |
|  | VM    | 28.0  | 35.0  | 38.0  |
|  | VA    | 38.0  | 42.0  | 65.0  |
| <b>Reglas</b>  |       |       |       |       |
| 1. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VC".   |       |       |       |       |
| 2. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VC".  |       |       |       |       |
| 3. si "%Error" es "Cero" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".   |       |       |       |       |
| 4. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VC".  |       |       |       |       |
| 5. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VB". |       |       |       |       |
| 6. si "%Error" es "Medio" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".  |       |       |       |       |
| 7. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Cero" entonces "%Apertura" es "VA".   |       |       |       |       |
| 8. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Medio" entonces "%Apertura" es "VM".  |       |       |       |       |
| 9. si "%Error" es "Alto" Y "Devpresion%" es "Alto" entonces "%Apertura" es "VC".   |       |       |       |       |

#### **10.1.5.7. Desarrollo Etapa de Construcción siete: Integración de todos los componentes del prototipo.**

Como etapa final de la construcción del prototipo del banco de presión se procede a realizar la integración de todos los componentes, en este punto es relevante hablar de un componente no nombrado hasta ahora aparte de la lista de materiales, se trata del regulador de aire de 0 a 150 PSIG, se contempló que dicho regulador es indispensable para el control de presión en unidades de INH<sub>2</sub>O, al disminuir el delta de presión a controlar por la válvula de control y servir de dispositivo de seguridad para los equipos de baja presión que al ser expuestos a 100 PSIG presión completa del aire de suministro podría ocasionar daño en los

mismos, a continuación se evidencia a través de registro fotográfico la integración y construcción final del prototipo.



*Figura 63. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico uno. Fuente: El autor.*



*Figura 64. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico dos. Fuente: El autor.*



*Figura 65. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico tres. Fuente: El autor.*



Figura 66. Integración final componentes prototipo, registro fotográfico cuatro. Fuente: El autor.

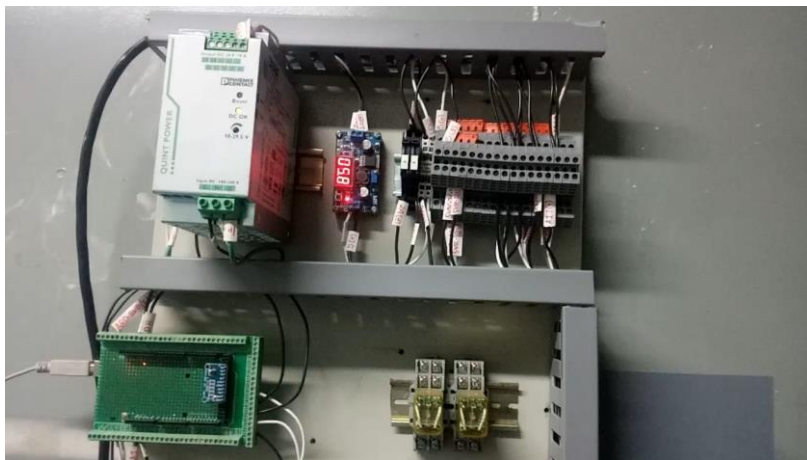


Figura 67. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico cinco. Fuente: El autor.

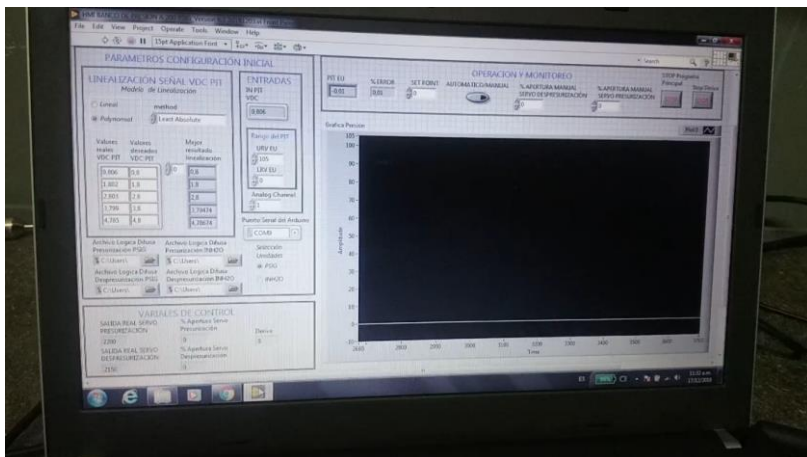


Figura 68. Integración final componentes del prototipo, registro fotográfico seis. Fuente: El autor.

## 11. Prueba del prototipo

Una vez construido e integrados todos los componentes del prototipo del banco de presión, se procede a ejecutar la última etapa de la metodología realizar pruebas al prototipo, dichas pruebas permitirán medir y comprobar el cumplimiento de las especificaciones y con ello la satisfacción de las necesidades de las partes interesadas en el desarrollo del prototipo, en este capítulo, se evidencian las pruebas realizadas al prototipo y sus resultados.

En el desarrollo de esta etapa de la metodología se espera tener los siguientes resultados:

- Ejecutar los experimentos bosquejados en la etapa anterior.
- Registrar el cumplimiento de especificaciones del prototipo.
- Identificar opciones de mejora para el prototipo.

Con la ejecución de esta etapa se da cumplimiento a los objetivos específicos:

- Validar el cumplimiento de los requisitos y especificaciones mínimas del banco de presión a través de distintas pruebas de verificación.
- Medir la efectiva disminución de horas hombre utilizadas para la verificación de los instrumentos transmisores de presión con la utilización del prototipo de banco de presión.

### 11.1. Actividades y tareas

Con el objetivo de lograr los resultados esperados en esta etapa del proyecto se ejecutan las siguientes actividades:

1. Ejecución y registro de pruebas experimentales.
2. Análisis de resultados.

#### 11.1.1. Actividad uno: Ejecución y registro de pruebas experimentales.

Esta actividad consta de las siguientes tareas.

1. Descripción y formulación de pruebas experimentales.

2. Ejecutar y registrar las pruebas experimentales.

### **11.1.2. Desarrollo actividad uno: Ejecución y registro de pruebas experimentales.**

#### ***11.1.2.1. Desarrollo tarea uno: Descripción y formulación de pruebas experimentales.***

En la etapa anterior construcción del prototipo más específicamente en la planeación se plantea un bosquejo experimental el cual permite validar el cumplimiento de las especificaciones del prototipo a cabalidad, a continuación, se describe cada uno de estos experimentos:

- Prueba uno: Lista de chequeo de cumplimiento tipo cuenta con: si o no:
  - Descripción: Por medio de una lista de chequeo se realizará la verificación visual del cumplimiento de algunas de las especificaciones del prototipo las cuales permiten este tipo de validación.
  - Especificaciones a validar: Las especificaciones a validar con esta prueba experimental son:
    - Cantidad de dinero gastado en el proyecto.
    - Voltaje de alimentación DC.
    - Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación.
    - Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.
    - Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar.
    - Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varia o no.
    - El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW.

- Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.
- Presión de aire de instrumentos disponible.
- Prueba dos: Prueba de estabilidad de la lectura de presión a distintas presiones a través del rango de operación del prototipo:
  - Descripción: Se verificara la estabilidad de la lectura de presión en la interfaz del software LabVIEW a través de 5 puntos ascendentes y 5 puntos descendentes diferentes a los anteriores a través del rango de operación del prototipo para cada una de las unidades de presión configuradas, para la presión en PSIG se realizara en el rango de 0 a 100 PSIG (rango máximo de operación del prototipo) y para la presión en INH2O se realizara a de 0 a 500 INH2O (rango de operación máximo de los equipos de medición de presión en INH2O de la planta) , se medirá el tiempo en el que la lectura no varía más de un decimal y más de dos decimales para cada uno de los puntos.
  - Especificaciones a validar: Las especificaciones a validar con esta prueba experimental son:
    - Tiempo en el que la lectura de los instrumentos no debe variar para considerarse estable.
- Prueba tres: Prueba de velocidad de presurización y despresurización a diferentes puntos de presión a través del rango de operación.
  - Descripción: Se mide el tiempo de presurización y despresurización entre dos puntos 5 veces con distintos puntos, esto se realiza para cada una de las unidades de presión configuradas, para la presión en PSIG se realiza en el rango de 0 a 100 PSIG (rango máximo de operación del prototipo) y para la presión en INH2O se realizará a de 0 a 500 INH2O (rango de operación máximo de los equipos de medición de presión en INH2O de la planta).



- Especificaciones a validar: Las especificaciones a validar con esta prueba experimental son:
  - Tiempo entre la presurización o despresurización para pasar de un punto de verificación a otro.
- Prueba cuatro: Prueba funcional por medio de la ejecución de actividad de verificación y ajuste de transmisor indicador de presión:
  - Descripción: Se ejecutara la actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión descrita en el procedimiento interno de HIDROCASANARE, anexo C: “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN”, con una duración de toda la jornada laboral, al ser la primera vez que se pone en servicio el prototipo se podrán evaluar varias especificaciones basadas en características propias de la operación del mismo, al terminar la jornada laboral el operador diligencia una lista de cumplimiento de especificaciones la cual permitirá conocer a través de la persona que ejecuta la actividad si las especificaciones evaluadas se cumplen o no.
  - Especificaciones a validar: Las especificaciones a validar con esta prueba experimental son:
    - Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.
    - Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos.
    - Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.
    - Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo.
    - Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.
    - Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.

- Tiempo de operación continuo del prototipo.

### 11.1.2.2. *Desarrollo tarea dos: Ejecutar y registrar las pruebas experimentales.*

A continuación, se registra la ejecución y los resultados de las pruebas experimentales realizadas:

- Ejecución y Registro Prueba uno: Lista de chequeo de cumplimiento tipo cuenta con:  
si o no:

La prueba se ejecuta según lo descrito en la etapa anterior, los resultados son registrados y evaluados en la siguiente tabla.

Tabla 22

*Lista de chequeo cumplimiento de especificaciones prueba uno.*

| Especificación a validar   | Pregunta para evaluar cumplimiento  | Respuesta  | Cumplen si o no |
|--|---|--|-----------------|
| Cantidad de dinero gastado en el proyecto.   | ¿El dinero gastado en la construcción del prototipo fue inferior a \$10000000?                            | Si, el dinero gastado según los cálculos aproximados realizados con el almacenista no supera los \$8000000.  | si              |
| Voltaje de alimentación DC.  | ¿El prototipo cuenta con facilidad para alimentar a 24 VDC los transmisores en verificación?              | Si, se cuenta con 3 borneras dedicadas para la alimentación de 24 VDC.   | si              |
| Número de conexiones habilitadas para la conexión de los equipos necesarios para el proceso de verificación. | ¿El prototipo cuenta con mínimo dos conexiones para conectar los equipos necesarios para la verificación? | Si, el prototipo cuenta con tres conexiones de las cuales una es una conexión bridada de 2X150 ideal para varios de los transmisores de la planta, las otras dos son, una de tipo acople rápido para la conexión de los patrones de verificación y la otra | si              |

---

|  |   |  |    |
|--|---|--|----|
|  |   | tipo OD para conexión de los demás tipos de transmisores.  |    |
| Diferencia de altura entre la conexión de los equipos a verificar y el patrón de verificación.                           | ¿La altura entre las conexiones para los equipos de verificación y a verificar es menor a 1 cm idealmente 0 cm? | Si, las tres conexiones se encuentran a 0 cm de altura de diferencia.  | si |
| Número de unidades de presión con las cuales se podrá trabajar.  | ¿El número de unidades de presión con las que trabaja el prototipo es igual o mayor a dos?                      | Si, el prototipo trabaja en unidades de PSIG y INH <sub>2</sub> O, las unidades usadas en toda la planta.  | si |
| Cifras significativas en decimales a tener en cuenta para determinar si la lectura varia o no.                           | ¿El número de decimales que se puede leer en la lectura de presión es mayor a uno?                              | Si, se pueden apreciar dos decimales en la lectura de presión.   | si |
| El prototipo se realiza con base a la utilización de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW. | ¿El prototipo opera bajo el uso de placas de desarrollo Arduino y la utilización del software LabVIEW?          | Si, la tarjeta Arduino es usada como tarjeta de adquisición de datos para controlar las entradas y salidas y el software LabVIEW es usado para la interfaz y el procesamiento. | si |
| Requisitos de alimentación eléctrica del prototipo.  | ¿El prototipo se alimenta a 110-120 VAC 50-60Hz?  | Si, el breaker de entrada y las fuentes reguladores operan a estos voltajes y frecuencias.   | si |
| Presión de aire de instrumentos disponible.  | ¿El prototipo opera utilizando la presione de aire de instrumentos disponible?                                  | Si, el aire de instrumentos se conecta a través de un acople rápido.   | si |

---

- Ejecución y registro prueba dos:

La prueba se ejecuta según lo descrito en la etapa anterior, los resultados son registrados y evaluados en la siguiente tabla.

Tabla 23

*Registro resultados prueba dos.*

| Punto | Ascendente o<br>Descendente | Unidad | Tiempo en segundos en<br>variar segundo decimal | Tiempo en segundos en<br>variar primer decimal | Cumple si<br>o no |
|-------|-----------------------------|--------|---|--|-------------------|
| 20    | Ascendente                  | PSIG   | 120   | 120  | si                |
| 40    | Ascendente                  | PSIG   | 122   | 122  | si                |
| 60    | Ascendente                  | PSIG   | 128   | 128  | si                |
| 80    | Ascendente                  | PSIG   | 130   | 130  | si                |
| 100   | Ascendente                  | PSIG   | 135   | 135  | si                |
| 90    | Descendente                 | PSIG   | 132   | 132  | si                |
| 70    | Descendente                 | PSIG   | 129   | 129  | si                |
| 50    | Descendente                 | PSIG   | 123   | 123  | si                |
| 30    | Descendente                 | PSIG   | 121   | 121  | si                |
| 10    | Descendente                 | PSIG   | 117   | 117  | si                |
| 100   | Ascendente                  | INH2O  | 154   | 154  | si                |
| 200   | Ascendente                  | INH2O  | 158   | 158  | si                |
| 300   | Ascendente                  | INH2O  | 161   | 161  | si                |
| 400   | Ascendente                  | INH2O  | 165   | 165  | si                |
| 500   | Ascendente                  | INH2O  | 169   | 169  | si                |
| 450   | Descendente                 | INH2O  | 168   | 168  | si                |
| 350   | Descendente                 | INH2O  | 164   | 164  | si                |
| 250   | Descendente                 | INH2O  | 159   | 159  | si                |
| 150   | Descendente                 | INH2O  | 154   | 154  | si                |
| 50    | Descendente                 | INH2O  | 151   | 151  | si                |

Con referencia a la prueba realizada se obtienen las siguientes observaciones:

- Cuando los valores en unidades tanto de PSIG como de INH<sub>2</sub>O cambiaron no cambio el segundo decimal y después el primero, los decimales cambiaron al tiempo por ende los tiempos registrados son iguales.

- Ejecución y registro prueba tres:

La prueba se ejecuta según lo descrito en la etapa anterior, los resultados son registrados y evaluados en la siguiente tabla.

Tabla 24

*Registro resultados prueba tres.*

| Puntos    | Unidad             | Tiempo en segundos<br>presurización | Tiempo en segundos<br>despresurización | Cumple si o<br>no |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|--|-------------------|
| 10 a 90   | PSIG               | 135                                 | 220                                    | si                |
| 20 a 80   | PSIG               | 114                                 | 206                                    | si                |
| 30 a 70   | PSIG               | 97                                  | 192                                    | si                |
| 40 a 60   | PSIG               | 74                                  | 181                                    | si                |
| 45 a 55   | PSIG               | 63                                  | 172                                    | si                |
| 50 a 450  | INH <sub>2</sub> O | 91                                  | 106                                    | si                |
| 100 a 400 | INH <sub>2</sub> O | 73                                  | 77                                     | si                |
| 150 a 350 | INH <sub>2</sub> O | 52                                  | 60                                     | si                |
| 200 a 300 | INH <sub>2</sub> O | 32                                  | 47                                     | si                |
| 225 a 375 | INH <sub>2</sub> O | 25                                  | 40                                     | si                |

- Ejecución y registro prueba cuatro:

La prueba se ejecuta según lo descrito en la etapa anterior, los resultados son registrados y evaluados en la siguiente tabla.

Tabla 25

*Lista de chequeo cumplimiento de especificaciones prueba cuatro.*

| Especificación a validar  | Pregunta para evaluar cumplimiento   | Respuesta   | Cumple si o no |
|---|--|---|----------------|
| Cantidad de personas necesarias para operar el prototipo.                     | ¿Durante la ejecución de la actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión considera que fue necesario otra persona adicional para operar el prototipo? | no, es suficiente un operador para operar el prototipo.   | si             |
| Número de puntos en los cuales se verificarán los instrumentos.               | ¿Los instrumentos se pudieron verificar en todos los puntos requeridos?  | Si, el procedimiento exige cinco puntos y se pudo verificar en los cinco puntos sin problema.   | si             |
| Operaciones que debe realizar el operario antes de operar el prototipo.       | ¿Se requirieron menos de 50 operaciones antes de empezar a operar el prototipo?  | Si, se realizó la energización del prototipo, el ajuste de lazo del transmisor, la comprobación de los servos en menos de 50 operaciones. | si             |
| Operaciones que debe realizar el operario durante la operación del prototipo. | ¿Se requirieron menos de 25 operaciones durante la operación del prototipo?  | Si, solo se debía fijar el set-point deseado y esperar.   | si             |
| Tiempo requerido para revisar el material didáctico de entrenamiento.         | ¿El tiempo utilizado para revisar el material didáctico de entrenamiento sobre la utilización del prototipo fue menor a 8 horas?                                       | Si, se requirió menos de una hora.  | si             |
| Los operarios afirman que la interfaz de operación es intuitiva.              | ¿La interfaz de operación es intuitiva?  | Si, todo está ordenado y se entiende de manera rápida el funcionamiento de la interfaz.   | si             |

---

|                         |                                   |                         |    |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----|
| Tiempo de operación     | ¿El prototipo opero correctamente | Si, opera sin problema. | si |
| continuo del prototipo. | durante la jornada laboral?       |                         |    |

---

### **11.1.3. Actividad dos: Análisis de resultados.**

Esta actividad costa de la siguiente tarea.

1. Analizar los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

### **11.1.4. Desarrollo actividad dos: Análisis de resultados.**

#### ***11.1.4.1. Desarrollo tarea uno: Analizar los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.***

- Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas demuestran el 100% del cumplimiento de las especificaciones objetivo aportando evidencia que indica que el prototipo satisface las necesidades del cliente para lo cual fue diseñado.
- En la prueba dos se observa la variación de hasta el primer decimal en la prueba de estabilidad mas no la del segundo decimal, esto se debe a que la resolución de la entrada analógica del Arduino es de apenas 10 Bits es decir 1024 niveles de tensión por lo que para la presión de 0 a 100 PSIG se pueden esperar cambios en la lectura de 0.1 PSIG aproximadamente y para la presión de 0 a 500 INH<sub>2</sub>O cambios de 0.5 INH<sub>2</sub>O aproximadamente.
- Durante la prueba tres se evidencia claramente que le tiempo de despresurización y presurización está ligado a la cantidad de volumen de aire necesaria en el pulmón, por tal razón los valores en INH<sub>2</sub>O son más rápidos en comparación a los valores en PSIG.
- En el anexo D “Informe de mantenimiento mes de enero del 2019 Hidrocasanare”, específicamente en la página 9, sección “eventos más relevantes del mes”, se indica que gracias a la utilización del prototipo de banco de pruebas de presión, se aprecia una disminución aproximada del 50% de las horas hombre requeridas para la

ejecución de la actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión, este informe es una evidencia clara del cumplimiento del objetivo “medir la efectiva disminución de horas hombre utilizadas para la verificación de los instrumentos transmisores de presión con la utilización del prototipo de banco de presión”.



## 12. Conclusiones

- Los resultados evidenciados indican cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos del proyecto, satisfaciendo las necesidades y requerimientos de las partes interesadas.
- A partir de la automatización de un proceso manual se puede llegar a optimizar recursos y tiempo en la ejecución o desarrollo del mismo.
- La metodología desarrollada plantea ser una herramienta idónea en el desarrollo de proyectos aplicados, permitiendo una estructura clara ordenada y consecuente con cada una de las etapas desarrolladas.
- La evidencia obtenida en el análisis de resultados indica que el problema planteado se solucionó correctamente.
- La correcta identificación de los requisitos y especificaciones mínimas que debe cumplir el prototipo, es la base para el desarrollo del mismo, permitiendo medir el cumplimiento de dichas especificaciones, se determinan los parámetros de operación óptimos y se puede evaluar si el prototipo cumple o no los requisitos para los cuales fue diseñado.
- Un correcto proceso de generación de conceptos del prototipo y selección del concepto facilita la determinación de la teoría de funcionamiento del mismo.
- Una planeación correcta de la construcción en donde se tenga claro el concepto del prototipo, facilita el diseño de la estructura física el sistema de control necesario y la interfaz de operación y procesamiento para el funcionamiento de acuerdo con las especificaciones y requisitos indicados.
- Se comprueba que la implementación de técnicas de control avanzadas como la lógica difusa a través de sistemas computarizados aplicado a pequeños proyectos es posible y eficiente.

- La utilización de microprocesadores específicamente tarjetas de desarrollo Arduino, como tarjeta de adquisición de datos y control de salidas es satisfactoria ratificando la posible utilización de las mismas en ámbitos industriales.

## Bibliografía

- Acedo, J. (2002). *Control Avanzado de Procesos (Teoría y práctica)*. Madrid, España: Diaz de Santos S.A.
- AUDEW. (25 de 02 de 2018). *Revisión del compresor de aire / inflador de neumáticos digital Audew 12V DC*. Obtenido de <https://medium.com/audew/audew-12v-dc-digital-tire-inflator-air-compressor-review-49499ad74d75>
- Cassiolato, C. (2008). *MEDIÇÃO DE PRESSÃO: TUDO O QUÊ VOCÊ PRECISA CONHECER. [MEDICIÓN DE PRESIÓN: TODO EL QUE USTED NECESITA CONOCER.]*. (S. E. Industriais, Ed.) Obtenido de <http://www.profibus.org.br/images/arquivo/pdf-1-543ebf8b1e0a2.pdf>
- CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)* (Tercera Edición en Español ed.). Madrid, España: CEM.
- Centro Español de Metrología CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)* (Tercera Edición en Español ed.). Madrid, España: CEM.
- Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación Industrial* (Octava Edición ed.). México D.F, México: Alfaomega Grupo Editor.
- Emerson Automation Solutions. (2017). *Guía de válvulas de control* (Quinta edición ed.). Marshalltown, Iowa 50158 EE UU: Fisher Controls International LLC.
- FLUKE Corporation. (09 de 2016). *Calibración de presión, Aplicaciones y soluciones*. Obtenido de [www.fluke.com](http://www.fluke.com/download/flukecal.com/pub/literature/6003978a-esla-pressure-cal-brochure-w.pdf): <http://download.flukecal.com/pub/literature/6003978a-esla-pressure-cal-brochure-w.pdf>
- FLUKE CORPORATION. (2016). *Calibración de presión, aplicaciones y soluciones*. Obtenido de [www.fluke.com/laam](http://www.fluke.com/laam): [www.fluke.com](http://www.fluke.com)
- Fluke Corporation. (05 de 08 de 2019). *Controladores/calibradores modulares de alta presión 8270A y 8370A*. Obtenido de [la.flukecal.com](https://la.flukecal.com/products/pressure-calibration/automated-pressure-controller-calibrators/high-pressure-pneumatic-co-1?quicktabs_product_details=2): [https://la.flukecal.com/products/pressure-calibration/automated-pressure-controller-calibrators/high-pressure-pneumatic-co-1?quicktabs\\_product\\_details=2](https://la.flukecal.com/products/pressure-calibration/automated-pressure-controller-calibrators/high-pressure-pneumatic-co-1?quicktabs_product_details=2)
- Hamlett, L. (2016). *Pressure Handbook A Basic Guide to Understanding Pressure [Manual de presión Una guía básica para entender la presión]*. (YOKOGAWA, Ed.) Obtenido de [www.yokogawa.com](http://www.yokogawa.com): <https://info.us.yokogawa.com/pressure-handbook-thanks.html?aliId=19541408>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Edición ed.). México D.F.: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- ICONTEC. (2015). *NTC-ISO 9001: SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD. REQUISITOS*. (Cuarta Actualización ed.). Bogotá D.C., Colombia.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. (2008). *ISO/IEC 15288 Systems and software engineering — System life cycle processes*. (Second edition 2008-02-01 ed.). Piscataway, NJ.: INTERNATIONAL STANDARD ISO.
- Instrumentos WIKA Colombia S.A.S. (05 de 08 de 2019). *Tipo CPC8000 Controlador de presión de precision Mensor*. Obtenido de [https://www.wika.co/cpc8000\\_es\\_es.WIKA](https://www.wika.co/cpc8000_es_es.WIKA)
- McConnell, S. (1996). *Rapid development : taming wild software schedules*. Washington: Microsoft Press.

- Montaña Quintero, H. (2017). *Modelo conceptual para el desarrollo de producto en el área de "Electrónica" para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Bogotá, Colombia.: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Otero Parada, D. (05 de 2018). *EL PAPEL DEL PETRÓLEO EN LA ECONOMÍA COLOMBIANA*. Bogotá, Colombia: Uniciencia, Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo. Obtenido de <http://www.indepaz.org.co>: <http://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2018/05/el-petr%C3%B3leo-en-la-econom%C3%ADa-colombiana.pdf>
- Perez, M. A., Perez Hidalgo, A., & Perez Berenguer, E. (2008). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. San Juan: Universidad de San Juan.
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la ingeniería* (Primera Edición ed.). México: Alfaomega Grupo Editor, S.A.
- RAE. (2019). *Diccionario de la Real Academia de la Lengua*. Barcelona: Oceano.
- SMAR. (10 de Junio de 2019). *Medición de presión: Características, Tecnologías y Tendencias*. Obtenido de Technology Company.: <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/medicion-de-presion-caracteristicas-tecnologias-y-tendencias>
- Total Temperature Instrumentation, Inc (DBA Instrumart). (10 de 02 de 2019). *Mensor CPC4000 Pressure Controller*. Obtenido de [www.instrumart.com](http://www.instrumart.com): <https://www.instrumart.com/products/42220/mensor-cpc4000-pressure-controller#!accessories>
- Total Temperature Instrumentation, Inc. (DBA Instrumart). (10 de 02 de 2019). *Controlador de presión modular GE Druck PACE5000 / PACE6000*. Obtenido de [www.instrumart.com](http://www.instrumart.com): <https://www.instrumart.com/products/24809/ge-druck-pace5000-pace6000-modular-pressure-controller#!accessories>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta edición ed.). México, D.F: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Vega, R. (05 de 05 de 2017). *Una nueva concienciación en cuanto a la calibración*. (I. W. S.A.U, Ed.) Obtenido de <https://www.bloginstrumentacion.com>: <https://www.bloginstrumentacion.com/instrumentacion/una-nueva-concienciacion-en-cuanto-la-calibracin/>
- Wiegand, A., & Elbert, C. (2012). *Calibration Technology Basics, reference instruments for pressure and temperature, professional calibration*[*Fundamentos de la tecnología de calibración, instrumentos de referencia para presión y temperatura, calibración profesional*] (Primera Edición ed.). Munich, Alemania: Bernhard Gerl, Mainz.
- WIKA Instrument Corporation. (2008). *WIKA Handbook Pressure & Temperature Measurement*[*Manual de WIKA Medición de presión y temperatura*]. Lawrenceville, USA: WIKA Instrument Corporation. Obtenido de [www.wika.com](http://www.wika.com)

## Anexos

## Anexo A: "Circular informática interna área de mantenimiento"

|   |   |                          |
|---|---|--------------------------|
|  | <b>CIRCULAR INFORMATIVA<br/>INTERNA ÁREA DE<br/>MANTENIMIENTO</b> | Página 1 de 1            |
|   |   | 18 de Septiembre de 2018 |

**Realizado por:**

Supervisor de Mantenimiento Ing. Rafael Alberto Angarita Marín.

**Dirigido a:**

Técnicos de instrumentación del área de mantenimiento.

**Asunto:** Invitación a presentar propuestas de optimización de tiempos de ejecución de las actividades de mantenimiento, a partir del diseño de la automatización o cambio de tecnologías utilizadas para el desarrollo de las mismas.

Por medio de la presente y con base a análisis realizado a los consolidados de informes mensuales presentados anteriormente, se identifica que las actividades de verificación y ajuste de instrumentos del área de instrumentación, requiere de un número de horas hombre significativas en la ejecución de las misma, en busca de optimizar esta situación se invita a los técnicos de instrumentación del área de mantenimiento a presentar propuestas o diseños basadas en automatización de procesos existentes o realizar la mejora tecnológica de los mismos, con el objetivo de disminuir los tiempos de ejecución y extender la cantidad de equipos asegurados a través del mantenimiento preventivo de la compañía.

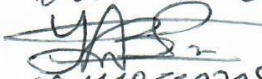
Las propuestas deben contemplar en lo posible el uso de recursos propios ya adquiridos por la compañía y que se encuentran en el almacén, de ser necesaria la compra de más recursos, la suma de estas compras y los implementos usados del almacén no pueden superar un presupuesto de \$10'000.000 (pesos colombianos), se debe buscar que la propuesta sea para una implementación de bajo costo que justifique su futura implementación y que se pueda evaluar la efectiva disminución de horas hombre a través de la posible implementación de las mismas.

La propuesta para revisión inicial y pre-aprobado se debe presentar través del "informe de inspección de hallazgos" código interno "HC-SIG-MSN-IIH-001".

Atentamente:


  
 NET. 900.682.561  
 SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO

Rafael Alberto Angarita Marín.  
Supervisor de Mantenimiento.  
C.C: 1098605374.

Recibi: Yair Batón  
 Tec. Instrumentario,  
 18 de sep 2018  
  
 C.C. 1118557725



Anexo B: "Informe de inspección de hallazgos de falla de equipos de la refinería de HIDROCASANARE"

|   |  |  |
|---|--|--|
|  | <b>INFORME DE INSPECCIÓN DE<br/>HALLAZGOS DE FALLA EN EQUIPOS DE<br/>LA REFINERÍA DE HIDROCASANARE</b> | HC-SIG-MAN-IIH-001<br>REV 0 VERSION 2<br>DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO<br>AGOSTO -2015 |
|---|--|--|

FECHA: 05 de octubre 2018

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO: Actividad Verificación y ajuste transmisores de presión

EJECUTOR(es) / ESPECIALIDAD: Yair Andrés Batón Peña / Mantenimiento

**HALLAZGOS:**

Se propone el diseñar un sistema automatizado para optimizar el procedimiento o actividad de verificación y ajuste de transmisores de presión.

**PROCEDIMIENTO:**

Atravez de la utilización de Arduino y software como Labview, se propone automatizar el sistema de generación de presión necesario para la verificación de instrumentos de presión de 0 a 100 Psig, rango en el que opera la mayoría de instrumentos de la planta.

**DIAGNÓSTICO:**

la ejecución de este procedimiento actualmente con la bomba neumática floke requiere gran tiempo en horas hombre en la presurización y despresurización.

**RECOMENDACIONES:**

Automatizar el proceso de presurización y despresurización asegurando el cumplimiento de lo indicado en el plan de mantenimiento código "HC-SIG-MTIO-9002".



EJECUTOR(es)  
NOMBRE: Yair Batón




OPERACIONES / INGENIERIA  
NOMBRE: WILLIAM CHASOY  
29-10-2018




NIT. 900.682.561  
SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO

SUPERVISOR MANTENIMIENTO  
NOMBRE: Rafael Arcuato M.

**Anexo C: “HC-SIG-MTTO-P-002 DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN”, páginas 4 a 7 d 8 del documento original.**

|   |  |                             |  |
|---|--|-----------------------------|--|
|  | DETERMINACIÓN PLANES DE MANTENIMIENTO TRASMISORES DE PRESIÓN |                             | <b>Código:</b><br><b>HC-SIG-MTTO-P-002</b> |
|   | <b>Página 4 de 8</b>   | <b>Aprobado: 23/04/2018</b> | <b>Versión: 2</b>                          |

detalle para la ejecución de la tarea en el análisis de riesgo anexo al permiso de trabajo, el cual efectúa en su valoración un análisis de seguridad para ejecución del trabajo, evaluando los riesgos en forma particular y definiendo los controles para minimizar su impacto.

El permiso de trabajo debe ser discutido por los ejecutantes antes de empezar la labor, con el fin de identificar los peligros, conocer los controles y evitar incidentes que puedan generar accidentes de trabajo o enfermedades ocupacionales a quien ejecuta la tarea. Los riesgos valorados en las evaluaciones de riesgos que puedan surgir en el análisis del permiso de trabajo y la forma de minimizarlo son de obligatorio conocimiento y aplicación.

El personal involucrado en los trabajos a realizar debe tener claro el concepto de peligro y riesgo para que el panorama anexo al permiso de trabajo sea lo más preciso evaluando los riesgos en forma particular y definiendo los controles para minimizarlos.

Si usted considera que el trabajo a realizar es inseguro, está en la obligación y tiene la autoridad para detenerlo.

## **8. DESCRIPCIÓN Y ACTIVIDADES:**

A continuación se describen los planes de mantenimiento preventivo.

### **8.1 Verificación e inspección en línea:**


Frecuencia de ejecución: Mensual.

1. Diligencie el permiso de trabajo.
2. Coordine con operaciones para tomar las medidas necesarias para la intervención del equipo, evaluando afectaciones directas o indirectas al proceso y tomando las medidas de control operativas pertinentes.

**Nota 1:** Cuando esta actividad coincida con la verificación y ajuste fuera de línea con frecuencia anual, la actividad de verificación e inspección en línea se realiza después de ejecutar esa actividad.

3. Verifique que la el equipo tenga lectura en campo y en el dispositivo terciario.
4. Inspección caja de conexionado: revisión del cableado, ajuste de conexiones, presencia de humedad.
5. Con el equipo despresurizada y alineado hacia la atmosfera verifique el error del cero del equipo en % del Span en el caso de los PIT, en el caso de los PDIT aisle las tomas de presión del proceso y alinee las recamaras del PDIT para verificar el error del cero presión diferencial del equipo en unidades de ingeniería y en % del Span.
6. Si el error encontrado supera el error máximo permitido para el equipo (Ver anexo A) el equipo en verificación requiere verificación y ajuste fuera de línea
7. Mida y registre el voltaje de alimentación en VDC.
8. Registre los datos de la inspección física y las lecturas de las mediciones realizadas junto con las observaciones o novedades pertinentes en el formato HC-SIG-MTTO-FO-007 INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN EN LINEA PIT, PT, FIT Y DIT, una vez terminada la actividad y diligenciado el formato en su totalidad este debe ser escaneado y adjuntado en la OT correspondiente en el software de mantenimiento MP9.
9. Levanté o normalice las acciones tomadas en el paso 2.



|   |   |                             |  |
|---|---|-----------------------------|--|
|  | DETERMINACIÓN PLANES DE<br>MANTENIMIENTO TRANSMISORES<br>DE PRESIÓN |                             | <b>Código:</b><br><b>HC-SIG-MTTO-P-002</b> |
|   | <b>Página 5 de 8</b>  | <b>Aprobado: 23/04/2018</b> | <b>Versión: 2</b>                          |

10. Realice limpieza del equipo.
11. Orden y aseo del área.
12. En el software de mantenimiento MP9, en la OT correspondiente a la actividad registre error del cero del equipo en % del Span y el voltaje de alimentación medido, las observaciones y novedades también deben ser reportadas en este espacio.

### 8.2 Verificación y ajuste de lazo de corriente 4 a 20 mA.

Frecuencia de ejecución: Trimestral.

1. Diligencie el permiso de trabajo.
2. Coordine con operaciones para tomar las medidas necesarias para la intervención del equipo, evaluando afectaciones directas o indirectas al proceso y tomando las medidas de control operativas pertinentes.

**Nota 2:** Cuando esta actividad coincida con la verificación y ajuste fuera de línea con frecuencia anual, la actividad de verificación y ajuste de lazo de corriente 4 a 20 mA se realiza después de ejecutar esa actividad y se deben realizar todos los pasos completos, es decir se debe realizar el ajuste del lazo aunque el error máximo de lazo este dentro de lo indicado en el Anexo A. Adicionalmente la actividad se debe registrar en el formato HC-SIG-MTTO-FO-001 VERIFICACIÓN TRANSMISORES DE PRESIÓN.


3. Utilizando el comunicador de campo HART y por medio del modo "Loop Test" del transmisor, realice la prueba de lazo inicial del equipo en 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del rango de calibración del mismo, las lecturas a comparar son las visualizadas en el dispositivo terciario (HMI, OMNI, computador de flujo, etc.) y las generadas por el transmisor ambas en unidades de ingeniería.
4. Identifique el error máximo del lazo en unidades de ingeniería, si el error encontrado no supera el error máximo permitido, para el equipo en verificación (según el anexo A) salte al paso número 8 de lo contrario continúe con el paso 5.
5. Utilizando el comunicador de campo HART realice el ajuste de lazo de corriente 4 a 20 mA.
6. Realice la verificación de lazo final o después de ajuste repitiendo el procedimiento del paso 3.
7. Identifique el error máximo del lazo en unidades de ingeniería, registre dicho valor en el software MP9, las observaciones y novedades también deben ser reportadas en este espacio.
8. Levanté o normalice las acciones tomadas en el paso 2.
9. Orden y aseo
10. Entregue el equipo a operaciones.

### 8.3 Verificación y ajusté fuera de línea

Frecuencia: Esta actividad se lleva a cabo anualmente para cada equipo o cuando la verificación en línea indique que es necesario.

1. Diligencie el permiso de trabajo.



|   |   |                             |  |
|---|---|-----------------------------|--|
|  | DETERMINACIÓN PLANES DE<br>MANTENIMIENTO TRANSMISORES<br>DE PRESIÓN |                             | <b>Código:</b><br><b>HC-SIG-MTTO-P-002</b> |
|   | <b>Página 6 de 8</b>  | <b>Aprobado: 23/04/2018</b> | <b>Versión: 2</b>                          |

2. Coordine con operaciones para tomar las medidas necesarias para la intervención del equipo, evaluando afectaciones directas o indirectas al proceso y tomando las medidas de control operativas pertinentes.
3. Desmonte el transmisor de presión y llévelo al laboratorio o banco de pruebas para presión.
4. Si los resultados del paso 2 indican que es necesario dejar instalado un transmisor de presión Backup, proceda con la ejecución de este paso de lo contrario salte al paso 5, posterior al desmonte proceda con la instalación de dicho transmisor Backup, recuerde que dicho transmisor debe estar configurado para el mismo rango de operación del transmisor a desmontar y debe tener un certificado de verificación no mayor a tres meses, ajusté el lazo de corriente 4 a 20 mA del transmisor Backup instalado.
5. Defina para el transmisor de presión 5 puntos de verificación distribuidos uniformemente a través del rango del equipo desde el 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del rango.
6. Monte el transmisor de presión en el banco de calibración de presión conformado por la fuente de alimentación, el calibrador de procesos FLUKE 725, el módulo de presión patrón, la bomba neumática o compresor neumático y el comunicador de campo protocolo HART.
7. Configure el calibrador de procesos en el modo medición de presión en las unidades de ingeniería que tenga configuradas el transmisor de presión a verificar.
8. Alimente el transmisor con la fuente a un voltaje cercano al de alimentación en campo.
9. Realice la verificación inicial del equipo comparándolo con el equipo patrón debidamente certificado, verifique en 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del rango de calibración del mismo ascendente y descendientemente. Las lecturas a comparar son las visualizadas por el instrumento localmente por medio del display o en su defecto por medio del comunicador de campo HART y las lecturas observadas en el patrón para cada una de las presiones nominales.


**Nota 3:** Durante la comparación entre la lectura del instrumento y la lectura del patrón tenga en cuenta la corrección del patrón según el certificado de calibración, si es necesario interpolar la corrección del patrón utilice el método de interpolación lineal.

**Nota 4:** El montaje realizado del equipo debe garantizar que la diferencia de altura entre el patrón y el equipo en verificación es cercana a 0 cm.

**Nota 5:** En el caso de estar ejecutando la verificación un transmisor de presión diferencial, recuerde que la generación de presión para generar lecturas de presión diferencial positiva se realiza por la recámara de alta mientras la recámara de baja se encuentra despresurizada y alineada a la atmósfera y si es necesario generar lecturas de presión diferencial negativa la generación de presión se realiza por la recámara de baja mientras la recámara de alta se encuentra despresurizada y alineada a la atmósfera, en este caso las lecturas del patrón pese a que son positivas se tomarán como negativas para una correcta verificación.

10. Identifique y registre el error máximo encontrado en % del Span.
11. Realice el ajuste del transmisor, recuerde tener en cuenta la corrección patrón durante el ajuste del transmisor.
12. Realice la verificación final repitiendo el procedimiento indicado en el paso 9.
13. Identifique y registre el error máximo encontrado en % del Span.



|   |   |                             |  |
|---|---|-----------------------------|--|
|  | DETERMINACIÓN PLANES DE<br>MANTENIMIENTO TRANSMISORES<br>DE PRESIÓN |                             | <b>Código:</b><br><b>HC-SIG-MTTO-P-002</b> |
|   | <b>Página 7 de 8</b>  | <b>Aprobado: 23/04/2018</b> | <b>Versión: 2</b>                          |

14. Registre los datos de la verificación y ajusté fuera de línea junto con las observaciones o novedades pertinentes en el formato HC-SIG-MTTO-FO-001 VERIFICACIÓN TRANSMISORES DE PRESIÓN, una vez terminada la actividad y diligenciado el formato en su totalidad este debe ser escaneado y adjuntado en la OT correspondiente en el software de mantenimiento MP9.
15. En el software de mantenimiento MP9, en la OT correspondiente a la actividad registre las observaciones y novedades presentadas.
16. Desmunte el transmisor de presión del banco de pruebas.
17. Instale el transmisor en campo.
18. Ajuste el cero atmosférico en el caso de los transmisores de presión manométrica y en el caso de los transmisores de presión diferencial ajuste el cero presión diferencial, con el equipo instalado presurizado, aislado y las recamaras alineadas.
19. Levanté o normalice las acciones tomadas en el paso 2.
20. Realice el Backup de la parametrización del transmisor de presión.
21. Orden y aseo.
22. Entregue el equipo a operaciones.

#### 9. ASPECTOS AMBIENTALES:

Cuando sea aplicable, los aspectos ambientales significativos asociados con la tarea y los posibles impactos al medio ambiente que se puedan generar, son identificados igualmente en el análisis de seguridad (si es solicitado) que se incluye para la ejecución de la tarea anexo al permiso de trabajo.

El permiso de trabajo debe ser leído y entendido por los ejecutantes antes de empezar la labor, con el fin de saber cuáles son los aspectos ambientales involucrados en la tarea, conocer los controles y evitar incidentes que puedan generar los posibles impactos al medio ambiente por el no-cumplimiento del procedimiento de trabajo.

Los aspectos ambientales valorados en el análisis de seguridad (si es solicitado) que se incluye para la ejecución de la tarea anexo al permiso de trabajo y la forma de minimizar los impactos son de obligatorio conocimiento y aplicación por el ejecutante de la tarea antes de iniciar la actividad.


Todos los residuos generados por las actividades propias del trabajo, deben ser identificados, seleccionados y depositados en los recipientes adecuados, para su posterior disposición en los lugares señalados por el cliente o autorizado por la autoridad ambiental competente del área de influencia del trabajo.

#### 10. DOCUMENTOS DE REFERENCIA:

##### 10.1 Trabajos citados

Centro Español de Metrología CEM. (2017). *Procedimiento ME-017 PARA LA CALIBRACIÓN TRANSDUCTORES DE PRESIÓN CON SALIDA ELÉCTRICA* (Digital 1 ed.). Madrid: Centro Español de Metrología.

**Anexo D “Informe de mantenimiento mes de enero del 2019 Hidrocasanare”,  
pagina 9 de 10 del documento original.**

|   |                      |                   |                   |
|---|----------------------|-------------------|-------------------|
|  | <b>INFORME</b>       |                   |                   |
|   | <b>MANTENIMIENTO</b> |                   |                   |
|   | <b>FECHA:</b>        | <b>28-02-2019</b> | <b>VERSION: 0</b> |

|  |                   |               |         |
|--|-------------------|---------------|---------|
| <PCE 01> PUERTA DE CORREDERA ELECTRICA NO.1 220 VAC<br>IP 44 BENINCA BISION 20 OM 5188-000006030   | 75 d 00 h 00<br>m | 0 d 09 h 00 m | 99,42 % |
| <SOV 100A> VALVULA SOLENOIDE MUESTRA DE CRUDO 180<br>PSI- 24 VDC- 10 WATT PARKER FLUID CONTROL T3C | 75 d 00 h 00<br>m | 0 d 03 h 30 m | 99,42 % |
| ABASTOS  | 25 d 00 h 00<br>m | 0 d 05 h 30 m | 99,47 % |
| <B 801B> CALDERA DE VAPOR 300 HP DISTRAL D 30 - 300 A<br>1792                                      | 25 d 00 h 00<br>m | 0 d 04 h 20 m | 99,67 % |
| <CO 0007> CONTENEDOR VESTIER   | 75 d 00 h 00<br>m | 0 d 06 h 00 m | 99,67 % |
| LABORATORIO  | 75 d 00 h 00<br>m | 0 d 06 h 00 m | 99,67 % |
| <C 200B> COMPRESOR DE AIRE QUINCY D 5120 20080311 - 0203   | 75 d 00 h 00<br>m | 0 d 03 h 30 m | 99,81 % |
| AIRES ACONDICIONADOS MINI SPLIT  | 25 d 00 h 00<br>m | 0 d 06 h 20 m | 98,94 % |

De acuerdo con el cuadro vemos los equipos que durante este último periodo de tiempo han disminuido su confiabilidad dado que se han presentado eventos reiterativos.

De estos equipos vemos en relevancia los siguientes equipos:

- Generadores eléctricos
- Calderas de vapor
- Bombas 700
- Sistema de aire de instrumentos

Estos son los equipos que durante el mes de enero bajaron su índice de confiabilidad por fallas.

**EVENTOS MÁS RELEVANTES DEL MES:**

- Calibración y verificación de equipos de medición floreña y hidrocasanare, se evidencio una disminución de aproximadamente el 50% de la horas hombre utilizadas en la actividad de verificación y ajuste transmisores de presión, gracias a la utilización del prototipo de Banco de pruebas de presión.
- Falla en el sistema de aire de instrumentos por acumulación de agua en el sistema lo cual ocasiono el cierre de la válvula SDV-001
- Acompañamiento a los trabajos de construcción del laboratorio de jep del área eléctrica.
- Análisis de Aero enfriadores

  
 NIT. 900.682.561  
 SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO

*[Handwritten Signature]*