



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

MENCIÓN EN SISTEMAS INDUSTRIALES

TEMA:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO

PARA ENTRENAMIENTO CON LAZOS DE CONTROL DE PRESIÓN Y

FLUJO EN LA EMPRESA CAMEI S.A.

AUTORES:

FREDDY FABRICIO COLOMA JÍMENEZ

ANTONIO FEDERICO PRIETO VILLAMAR

DIRECTOR: ING. VICENTE PEÑARANDA

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA ENTRENAMIENTO CON LAZOS DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO EN LA EMPRESA CAMEI S.A.”** con resolución de aprobación de consejo de carrera **N° 136-005-2017-03-01** realizado por los estudiantes **FREDDY FABRICIO COLOMA JIMENEZ** con **C.C. 0921971552** y **ANTONIO FEDERICO PRIETO VILLAMAR** con **C.C. 0920819919**, obteniendo un producto que cumple con los objetivos del diseño de aprobación, informe final y demás requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para considerados como trabajo final de titulación.

Guayaquil, 27 de julio del 2017

Ing. Vicente Peñaranda

Docente

C.C. 0916113426

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Freddy Coloma portador de C.I. 0921971552 Antonio Prieto portador de C.I. 0920819919, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual por su reglamento y por su normatividad institucional vigente.

Guayaquil, Julio del 2017

DEDICATORIA

A Dios por permitirme tener la oportunidad de realizar un sueño que tenía desde niño.

A mi abuelita Cristina Chipre la persona que fundamento mis pilares y cimientos de vida.

A mis padres Sra. Dolores Jiménez Chipre y Sr. Freddy Coloma Pinos por su ayuda y enseñanzas de siempre perseguir mis sueños.

A mi esposa Mariana Tobar por ser mi apoyo y tener siempre esa palabra espiritual.

A mi hermano Alfredo Briones a pesar de no ser mi hermano de sangre eres ese hermano mayor que siempre guía mi camino.

A mis docentes y amigos por aportar con sus conocimientos y experiencias impartidas que ayudaron a culminar esta etapa de mi vida.

A mis hijos, que en todo momento y lugar siempre tengan presente a Dios, la humildad y la sencillez con constancia y perseverancia que es lo que les ayudara alcanzar cada meta e ideales que tenga por grande o pequeño que estos sean culmínenlo.

Freddy Fabricio Coloma Jiménez

DEDICATORIA

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por formarme como profesional para contribuir con el desarrollo de nuestra sociedad, a los docentes por transmitir sus conocimientos y experiencias, para adoptarlos y aplicarlos en el ejercicio laboral.

Doy gracias a mis padres por regalarme con todo su amor y esfuerzo ésta gran herencia de vida que la llevaré siempre en mi corazón y que será mi instrumento para materializar los sueños que decida construir; y un agradecimiento muy sentido a mi Tía Nelly Villamar por cuidarme y alimentarme cumpliendo la función de madre en la ausencia de mis padres

Antonio Federico Prieto Villamar

AGRADECIMIENTO

A Dios por culminar una etapa más de mi vida como persona y profesional y entregar este logro a mis padres por todo el esfuerzo que hicieron para construir un mejor futuro; a mi esposa que con sus palabras de aliento permitieron culminar este camino para la obtención de este logro y mis hijos pilares importantes de mi vida; mis docentes y la institución salesiana que con sus enseñanzas me permitieron llegar; y a mi compañero y amigo Sr. Antonio Prieto quien desde las aulas de colegio logramos tener este sueño y poder lograr plasmarlo consolidarlo y culminarlo.

Freddy Fabricio Coloma Jiménez

AGRADECIMIENTO

A mi padre Ing. Hugo Prieto Aguirre y a mi madre Sra. Rita Villamar Robalino dedico ésta obtención de título universitario, cristalizando el anhelo y una de las razones de ser padres, demostrándome que el amor de padre y madre lo puedo todo, que el esfuerzo y la perseverancia al final tiene su recompensa, y que los momentos difíciles que se nos presentan en la vida son los mejores momentos para darnos cuenta las capacidades que llevamos y de lo que estamos hecho.

Dedico éste logro a mis hermanos, familiares, amigos y amistades que de una u otra forma me expresaron su apoyo y en su propio estilo me supieron dar palabras de ánimo para continuar y concluir ésta meta que será el inicio de muchas más.

Dedico éste anhelo convertido en realidad, a todos los que hacemos hasta lo imposible por cumplir nuestros sueños, enseñándonos que la disciplina, orden y perseverancia son las cualidades que debemos sembrar y cosechar para conseguir lo que nos propongamos; y dedicado muy especialmente a mis hijos que en éste momento que están leyendo ésta dedicatoria son mi razón de vivir como lo soy para sus abuelos, y son el amor de mi vida.

Antonio Federico Prieto Villamar

RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	TEMA DE PROYECTO DE TITULACIÓN
2017	FREDDY FABRICIO COLOMA JIMÉNEZ ANTONIO FEDERICO PRIETO VILLAMAR	ING. VICENTE PEÑARANDA	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA ENTRENAMIENTO CON LAZOS DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO EN LA EMPRESA CAMEI S.A.

El presente proyecto de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA ENTRENAMIENTO CON LAZOS DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO EN LA EMPRESA CAMEI S.A.”** consiste en implementar un banco de pruebas para equipar el laboratorio e impartir Cursos de Capacitación, Ensayos de control para aplicaciones industriales, etc. permitiendo ejecutar lazos de control PID con parámetros de presión y flujo.

Para implementar éste banco se usan los siguientes elementos: un Reservorio de agua, una Bomba que se usa como la fuente de circulación del fluido, un Controlador Lógico Programable (PLC), una interfaz táctil, un Sensor de flujo, un Sensor de presión, un variador de velocidad, una válvula solenoide proporcional, y demás componentes de maniobra.

Por medio de este módulo didáctico, los participantes podrán experimentar con los equipos e instrumentos que se usan en el campo industrial, entrenarse y parametrizar los diferentes lazos de control PID que se ejecutan en las distintas aplicaciones de un proceso determinado.

PALABRAS CLAVES

Presión, Flujo, Bomba, Controlador, Interfaz táctil, Válvula proporcional, Variador, PID.

ABSTRACT

YEAR	STUDENTS	DIRECTOR	TOPIC
2016	FREDDY FABRICIO COLOMA JIMÉNEZ ANTONIO FEDERICO PRIETO VILLAMAR	ING. VICENTE PEÑARANDA	DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DIDACTIC TEST BANK FOR TRAINING WITH PRESSURE AND FLOW CONTROL TIES IN THE COMPANY CAMEI S.A.

This graduating project: " DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DIDACTIC TEST BANK FOR TRAINING WITH PRESSURE AND FLOW CONTROL TIES IN THE COMPANY CAMEI S.A." consists of implementing a test bank in order to equip the laboratory and impart Trainings, Control test for industrial applications, etc. allowing to run PID control loops with pressure and flow parameters.

The following elements are used for implementing this bank: a Tank, a pump used to move the fluid, a Programmable Logic Controller (PLC), a Touch interface, a flow sensor, a pressure sensor, a driver, a proportional solenoid valve, and among other elements.

By means of this didactic module, the users will be able to experiment with the equipments and instruments which are used in the industrial field, train and set various PID control loops that are commissioned in several applications of a determined process.

KEYWORDS

Pressure, Flow, Pump, Controller, Touch interface, Proportional valve, Driver, PID.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	III
DEDICATORIA.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE GENERAL	X
INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Delimitación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivos generales	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Justificación.....	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1 Adquisición de datos	5
2.1.1 Sensor de flujo	5
2.1.2 Sensor de presión	6
2.2 Procesamiento de señal.....	6
2.2.1 Controlador Lógico Programable (PLC)	7
2.2.2 Interface HMI.....	8
2.2.3 Lazo PID.....	9
Acción integral.....	11
Acción derivativa.....	11
2.3 Actuadores	13
2.3.1 Driver	13
2.3.2 Bomba	15
2.3.3 Válvula proporcional	16
3. MARCO METODOLÓGICO	19
3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO	19

3.1.1	Diseño del banco.....	19
3.1.2	Ubicación de los elementos.....	20
3.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAZOS PID	27
3.2.1	Lazo PID control de flujo a través del variador	27
3.2.1.1	Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación	28
3.2.1.2	Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema.....	30
3.2.1.3	Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point.....	31
3.2.2	Lazo PID control de presión a través del variador	33
3.2.2.1	Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación..	34
3.2.2.2	Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema.....	36
3.2.2.3	Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point	36
3.2.3	Lazo PID control de flujo a través de la servo válvula	38
3.2.3.1	Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación	39
3.2.3.2	Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema.....	41
3.2.3.3	Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point.....	42
3.2.4	Lazo PID control de presión a través de la servo válvula	44
3.2.4.1	Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación	45
3.2.4.2	Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema.....	47
3.2.4.3	Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point.....	47
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	50
4.1.1	Condiciones iniciales	50
4.1.2	Pruebas de funcionamiento de lazo abierto	52
4.1.3	Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Flujo – VFD	54
4.1.4	Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Flujo - Válvula	56
4.1.5	Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Presión - Válvula	57
4.1.4	Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Presión - VFD	58
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la empresa CAMEI S.A.....	3
Figura 2. Sensor de flujo.....	5
Figura 3. Dato de placa Sensor de flujo	6
Figura 4. Sensor de presión.....	6
Figura 5. PLC Modicon 221	7
Figura 6. Visualización de entradas y salidas PLC Modicon 221	7
Figura 7. Módulo de Entradas y salidas análogas.....	8
Figura 8. Datos de placa del módulo de Entradas y salidas análogas	8
Figura 9. HMI STO531.....	9
Figura 10. Datos de placa HMI STO531	9
Figura 11. Diagrama de un control PID.....	10
Figura 12. Reducción de Carga en su Trayectoria.....	12
Figura 13. Sobre la Fuente que Cede Energía.....	12
Figura 14. <i>Lazo de control de presión de líquido</i>	12
Figura 15. Driver Altivar12	14
Figura 16. Entrada monofásica Driver Altivar12.....	14
Figura 17. Salida trifásica Driver Altivar12	14
Figura 18. Datos de placa Driver Altivar12.....	14
Figura 19. Bomba de agua	15
Figura 20. Válvula proporcional	16
Figura 21. Bobina de válvula proporcional	17
Figura 22. Partes internas de válvula proporcional	17
Figura 23. Ubicación de partes internas de válvula proporcional	17
Figura 24. Conexión de válvula proporcional	18
Figura 25. Modelo en 3D del banco	19
Figura 26. Medidas del banco de control	20
Figura 27. Vista lateral izquierda.....	20
Figura 28. Ubicación de llaves de paso	21
Figura 29. Sensor de presión.....	21
Figura 30. Sensor de flujo.....	22
Figura 31. Conexión de los sensores de presión y flujo	22
Figura 32. Válvula proporcional	23

Figura 33. Conexión de la Válvula proporcional.....	23
Figura 34. Bomba de agua	24
Figura 35. Conexión de la bomba de agua	24
Figura 36. Encendido y apagado del sistema	25
Figura 37. Distribución interna del tablero.....	25
Figura 38. Tablero eléctrico interno	26
Figura 39. Tablero eléctrico externo	26
Figura 40. Lazo PID flujo - variador	27
Figura 41. Diagrama de flujo del control de flujo a través de la bomba	28
Figura 42. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación..	30
Figura 43. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point....	32
Figura 44. Gráfica de Linealidad PID de Flujo - Variador	32
Figura 45. Lazo PID presión - variador	33
Figura 46. Diagrama de flujo del control de presión a través de la bomba ...	33
Figura 47. Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación.....	35
Figura 48. Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point.....	37
Figura 49. Gráfica de Linealidad de Presión - Variador.....	38
Figura 50. Lazo PID flujo – servo válvula.....	38
Figura 51. Diagrama de flujo del control de flujo a través de la servo válvula	39
Figura 52. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación..	41
Figura 53. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point.....	43
Figura 54. Gráfica de Linealidad de Flujo - Válvula.....	43
Figura 55. Lazo PID presión – servo válvula.....	44
Figura 56. Diagrama de flujo del control de presión a través de la servo válvula	44
Figura 57. Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación.....	46
Figura 58. Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point	48
Figura 59. Gráfica de Linealidad Lazo PID de Presión - Válvula.....	49
Figura 60. Habilitación del MCR	50
Figura 61. Nombre y clave para acceso.....	50

Figura 62. Nombre para acceso.....	51
Figura 63. Teclado de ingreso	51
Figura 64. Ingreso de clave	51
Figura 65. Menú principal	52
Figura 66. Curvas de flujo y presión a través del variador	53
Figura 67. Curvas de flujo y presión a través de la servo válvula.....	54
Figura 68. Control de flujo por VFD	55
Figura 69. Ajuste de PID flujo – VFD	55
Figura 70. Ajuste de PID flujo – VFD	55
Figura 71. Curvas de funcionamiento del PID flujo – VFD	56
Figura 72. Salir del sistema de control.....	56
Figura 73. Control de flujo por válvula.....	57
Figura 74. Control de flujo por válvula.....	57
Figura 75. Control de presión por válvula	57
Figura 76. Ajuste de PID de presión por válvula	58
Figura 77. Control de presión por variador.....	58
Figura 78. Ajuste de PID de presión por variador	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación	29
Tabla 2. Datos Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point	31
Tabla 3. Datos Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación.....	34
Tabla 4. Datos Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point.....	36
Tabla 5. Datos Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación.....	40
Tabla 6. Datos Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point.....	42
Tabla 7. Datos Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación	45
Tabla 8. Datos Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point.....	47
Tabla 9. Datos de usuario y contraseña.....	51
Tabla 10. Datos de lazo abierto del variador.....	52
Tabla 11. Datos de lazo abierto del variador.....	53

INTRODUCCIÓN

En un mundo modernizado el cual evoluciona constantemente, busca nuevas maneras de realizar procesos de forma confiable y estable lo que conlleva a la utilización de máquinas o métodos para prescindir de la mano del hombre. Anteriormente el control y la supervisión de cada proceso era realizada por una persona, ahora, gracias a los lazo PID se elimina la necesidad de supervisión continua de una operación debido a que estos lazos, a través de una retroalimentación, puede autorregularse para mantener una consigna de una manera estable con lo que el proceso se vuelve estable y eficiente.

La aplicación de los lazos PID no tiene límites si de control se trata, al no existir valores preestablecidos se pueden usar para aplicaciones como controles de temperatura, niveles, peso, flujo, presión, etc. Los cuales se pueden modificar para tener mejores resultados en tiempo de respuesta y exactitud.

En este documento se encuentra detallado el diseño de un banco de prueba para control de flujo o presión mediante lazos cerrados PID controlando un driver y una servo válvula, tiene 5 opciones de controles:

- ✓ Flujo – VFD el cual controla el flujo a través de la velocidad de la bomba
- ✓ Flujo – válvula el cual controla el flujo a través de la apertura de la válvula
- ✓ Presión – VFD el cual controla la presión a través de la velocidad de la bomba
- ✓ Presión – válvula el cual controla la presión a través de la apertura de la válvula
- ✓ Modo Manual el cual se puede realizar pruebas en lazo abierto

1. EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El mundo de hoy es cada vez más competitivo, existen más emprendedores los cuales se innovan para prestar mejores servicios a los clientes es por ello que las empresas deben estar en constante evolución para mantener su mercado e incrementar sus clientes, y una forma de hacerlo es presentando sus productos en aplicaciones reales, dinámicas y didácticas.

La empresa CAMEI S.A. (Compañía de Automatización y Modernización Empresarial e Industrial S.A.) ubicada en la ciudad de Guayaquil con dirección Nueva Kennedy, Av. Olimpo 204B entre la D y la E, requiere la implementación de varios Bancos de prueba para el equipamiento de la Sala de Entrenamiento, ya que esto servirá para la capacitación del personal técnico interno y de los clientes, logrando con esto, que se tenga personal técnico capacitado y de primera línea para resolver problemas a nivel industrial.

1.2 Delimitación del problema

El Banco de pruebas propuesto para la Sala de Entrenamiento es una herramienta tecnológica que permitirá a los Ingenieros de aplicación de la empresa, particulares y practicantes, realicen pruebas de Lazos de control PID de presión y flujo, conozcan, interactúen, configuren y programen los equipos que se utilizan en la industria; empleando equipos como: bomba centrífuga, variador de frecuencia, sensores de flujo y presión, válvula proporcional, PLC, Pantalla táctil, y demás elementos.

La construcción del Banco de Prueba que contendrá los diferentes equipos, instrumentos, materiales y demás, se lo construirá en un periodo de 6 meses y tendrá dimensiones aproximadas de 1500x1000x800mm y será implementando en la Sala de Entrenamiento de la empresa CAMEI S.A. con dirección Cdla. Nueva Kennedy, Av. Olimpo 204B entre la D y la E.

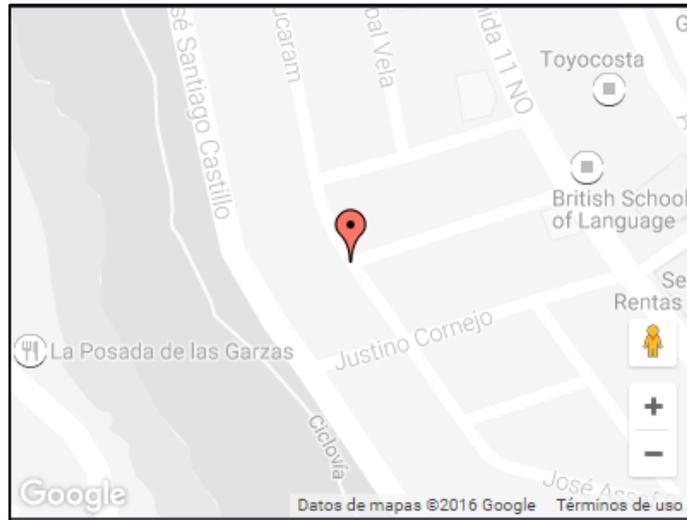


Figura 1. Ubicación de la empresa CAMEI S.A.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

Diseñar e implementar un Banco de pruebas para controlar valores de consigna como presión y flujo; utilizando equipos y elementos industriales con la finalidad de que sea usado para fines de entrenamiento y capacitación de personal técnico.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Investigar los métodos de control para operar lazos PID de presión y flujo, y determinar la instrumentación y equipos adecuados para realizar las pruebas respectivas.
- ✓ Estudiar la curva de funcionamiento de una Bomba centrífuga y determinar los intervalos de operación de control de presión y flujo con una carga aplicada.

- ✓ Diseñar e implementar lazos de control tipo PID para el control de los Set Point de los parámetros presión y flujo utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC).
- ✓ Configurar sensores de presión, sensor de flujo y variador de frecuencia bajo las condiciones determinadas del sistema.
- ✓ Diseñar una interfaz de usuario (HMI) para interactuar con el sistema y ejecutar el control de los parámetros ya mencionados.

1.4 Justificación

El tema propuesto del Diseño e implementación de un Banco de pruebas será de mucha importancia para la empresa CAMEI S.A. ya que permitirá dotar a la Sala de Entrenamiento de una infraestructura tecnológica para impartir las Charlas de Capacitación, Asesoramientos, Demostraciones de aplicaciones, etc. aportando con un valor agregado valioso al servicio que brinda la empresa.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos se lo realizó mediante transductores de flujo marca Sick y presión marca Sick los cuales están instalados en la tubería de salida de la bomba.

2.1.1 Sensor de flujo

El sensor de flujo en el banco de prueba es de marca Sick el cual puede medir líquidos a una temperatura de 0 a 80°C con una presión máxima de 10 bares.

Puede medir caudales mínimo de 5 l/min y máximo 240 l/min con una resolución de 0.03 l/min. Su salida analógica 4 mA ... 20 mA, para caudal y temperatura actuales, 1 salida de estado/impulsos salida de transistor para contar volúmenes, supervisión de tubo vacío, valor límite de caudal, salida de dosificación, dirección del flujo hacen que este sensor sea el indicado para nuestro proyecto.



Figura 2. Sensor de flujo



Figura 3. Dato de placa Sensor de flujo

2.1.2 Sensor de presión

El sensor a utilizar en el banco de prueba es de marca Sick el cual puede medir líquidos y gaseoso a una temperatura de 0 a 80°C con un margen de presión de 0 a 160 PSI. Su exactitud es de +/- 1% por lo que su lectura es confiable. Su salida analógica 4 mA a 20 mA, permite conectarse al control de una manera sencilla.



Figura 4. Sensor de presión

2.2 Procesamiento de señal

Las señales de los sensores de presión y flujo ingresaran a un PLC el cual convierte dichas señales eléctricas en caudal y presión las cuales los compara con la información que deseamos obtener a través de una HMI.

2.2.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

El Modicon M221 ofrece el mejor rendimiento en su clase. El cual tiene integrado puerto USB y tarjeta SD, interruptor RUN/STOP y puertos de comunicación Ethernet y serial. Así mismo tiene un alto grado de flexibilidad que permite agregar módulos adicionales como los de seguridad, arrancadores de motores, módulos de entrada y salida análogas o digitales. Con respecto al software de programación es de fácil manipulación con bloques pre configurado que permiten el ahorro de tiempo y líneas de programación.



Figura 5. PLC Modicon 221

El Modicon M221 es un controlador lógico tipo maquina estructurada de Schneider Electric de Schneider Electric ya que es una solución intuitiva para la automatización de maquinaria con todas las funciones necesarias para fabricar maquinas que mejoren las líneas de producción. Desde el diseño y desarrollo, hasta la puesta en marcha y mantenimiento, es una solución completa para fabricantes de maquinaria que presenta ventajas a lo largo de todo el ciclo de vida de las máquinas. (Scneider, 2017)



Figura 6. Visualización de entradas y salidas PLC Modicon 221

Dicho controlador tiene 8 entradas digitales y 6 salidas digitales las cuales son tipo relay. Para la lectura de señales análogas se colocará un módulo adicional el cual tiene 4 entradas análogas y 2 salidas análogas, estas entradas y salidas pueden ser configuradas para niveles de voltaje (0 a 10v) o corriente (4 a 20ma).



Figura 7. Módulo de Entradas y salidas análogas



Figura 8. Datos de placa del módulo de Entradas y salidas análogas

2.2.2 Interface HMI

Esta interface, marca Schneider Magelis y modelo STO531 la cual tiene una resolución 320 x 240 pixeles con un tamaño 3.4 pulgadas y un almacenamiento de memoria de 64 MB



Figura 9. HMI STO531

Mediante esta pantalla táctil se pueden colocar las presiones y caudales que se deseen y se comprobaba a través de los sensores la eficiencia de los actuadores



Figura 10. Datos de placa HMI STO531

2.2.3 Lazo PID

Un controlador PID (Proporcional Integrativo Derivativo) es un sistema de control de un actuador al cual se le alimenta una señal de referencia de un sensor dentro de un ciclo cerrado. Este tipo de control es ampliamente usado en la industria para el control de sistemas de cualquier tipo de proceso como por ejemplo control de temperatura, flujo, presión, llenado, etc.

El control PID es un sistema al que le entra un *error* calculado a partir de la salida deseada, menos la salida obtenida, este valor es usado como entrada en el sistema que queremos controlar. El controlador intenta minimizar el error ajustando la entrada del sistema a través de la salida del mismo.

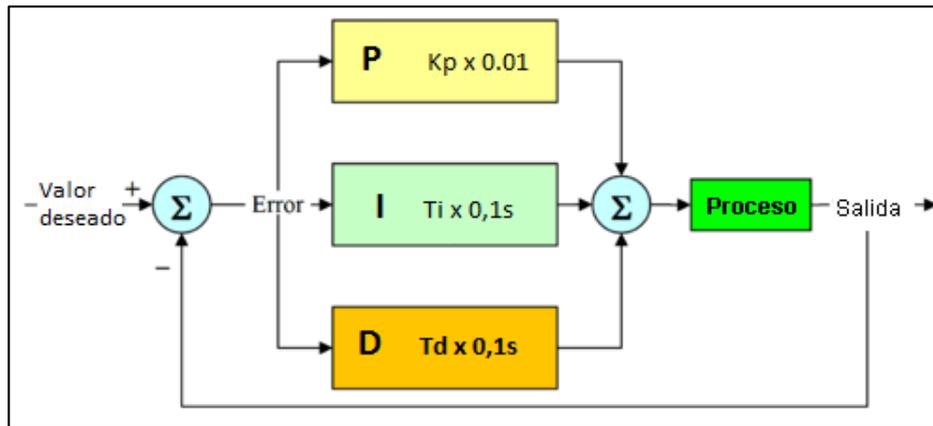


Figura 11. Diagrama de un control PID

El controlador PID está determinado por tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo. Dentro de este sistema se pueden realizar varios controles por ejemplo un controlador Proporcional Integral se puede generar colocando el derivativo a 0 y un controlador Proporcional el integrativo y el derivativo serán 0, etc.

Cada parámetros de este control influye en mayor medida sobre alguna característica de la salida (tiempo de establecimiento, sobre oscilación,...) pero también influye sobre las demás, es por ello que no se encontraría un PID que redujera el tiempo de establecimiento a 0, la sobre oscilación a 0, el error a 0,... sino que se trata más de ajustarlo a un término medio cumpliendo las especificaciones requeridas.

Acción proporcional

Existen tres modelos de control que son el resultado de una acción proporcional, cuando se encuentren presentes los modelos integral y derivativo los dos se suman al resultado antes mencionado.

Es decir que proporcional es un valor que multiplica la resultante del porcentaje que se encuentra a la salida del controlador. El valor multiplicativo lo llamamos ganancia con lo que podemos cambiar el resultado de la operación.

Acción integral

La acción integral genera una respuesta proporcional a la integral del error. La acción integral elimina el error en régimen estacionario, el cual es provocado por el modo proporcional. Una de las desventajas es que se obtiene un mayor tiempo de inestabilidad, una respuesta más lenta y el periodo de oscilación es mayor que en el caso de la acción proporcional.

Acción derivativa

La velocidad que existe en un cambio se le denomina derivada la misma que tiene un resultado proporcional gracias a una acción que sumándose con otras acciones de la misma naturaleza derivativa hace que reduzca las variaciones en el resultado final.

Un controlador PID puede funcionar de varias maneras sin lograr obtener un PID estable, haciendo necesario que se verifiquen las variables del PID con el modo de prueba y error tomando en consideración la resultante para con este valor, poder verificar las variables antes mencionadas siendo de esta forma, este el modo más utilizado.

Control de caudal

Para este tipo de control la incidencia de la variable a controlar es sobre el flujo, esta operación es directa, por lo tanto la ganancia es igual a 1. Típicamente, los diseños de ingeniería para el control de caudal se los realiza actuando sobre la reducción de carga en su trayectoria Figura12. y sobre la fuente que cede energía Figura 13. al fluido. Estos tipos de control tienen un modelado de comportamiento lineal, en este caso el intervalo de esta linealidad está entre el sensor con la válvula proporcional o la bomba centrífuga.

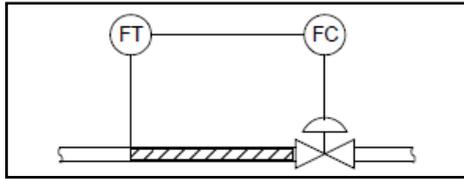


Figura 12. Reducción de Carga en su Trayectoria

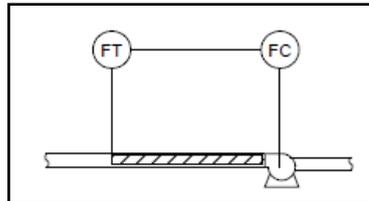


Figura 13. Sobre la Fuente que Cede Energía

Lazos de control de presión de líquidos

La operación de control de presión de un líquido se logra con la regulación de su caudal siendo estas siempre lecturas de naturaleza análoga.

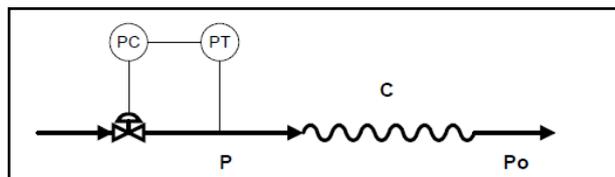


Figura 14. Lazo de control de presión de líquido

Según la facultad de ciencias exactas y tecnologías FACET de la Universidad Nacional de Tucuman. “El proceso, en este caso (variable de entrada P caudal, variable de salida Po presión), ya no tiene una ganancia adimensional igual a 1 ó (-1) sino que es recíproca. Si p es la variable controlada y suponemos que el líquido circula a través de una línea con una resistencia de coeficiente de flujo C y que descarga a una contra-presión constante p0, para flujo turbulento y en estado estacionario vale:

$$P = p_0 + \frac{F^2}{C^2}$$

y la ganancia del proceso resulta:

$$K_p = \frac{\partial p}{\partial F} = \frac{2F}{C^2} = \frac{2(p - p_0)}{F}$$

Como K_p varía inversamente con el caudal F y los dispositivos de medición de presión son lineales (KT constante) la característica más apropiada para el elemento final de control sería *igual porcentaje*.

Esto no es válido si p_0 no permanece constante y resulta ser la principal perturbación.

En este caso K_p varía en forma proporcional con el caudal (C es constante) y la mejor característica de flujo instalada resultaría ser la de *apertura rápida*.

Esta variable también es ruidosa como el caudal, por lo que el controlador recomendado es PI que asegure la eliminación del off set. Las bandas proporcionales con la que se ajustan estos controladores rondan el 50%.

La diferencia respecto al de caudal radica en los alcances que suelen emplearse para medir presión por lo que rara vez el set point está en el término medio del rango.” (Tucamán, 2016)

2.3 Actuadores

Con la información obtenida de los sensores y procesada por el PLC a través de un lazo de control, envía las señales de salidas a los actuadores, a un driver por el cual controla la bomba para aumentar el caudal, y a su vez envía señales a una válvula proporcional para el control de la presión.

2.3.1 Driver

El controlador escogido es un altivar 12 debido a sus prestaciones, tamaño, facilidad de manejo y robustez.

2.3.2 Bomba

Son recomendadas para bombear agua limpia, sin partículas abrasivas y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba. Por su confiabilidad, simplicidad en el uso y por su ventaja económica, son aptas para el uso doméstico y en particular para la distribución del agua acopladas a pequeños tanques de presión, para irrigación de huertos y jardines. Adicionalmente en aplicaciones industriales como sistemas de acondicionamiento y enfriamiento. La instalación se debe realizar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.

RANGO DE DESEMPEÑO

- ✓ Caudal hasta 900 l/min (54 m³/h)
- ✓ Altura manométrica hasta 100 m

LÍMITES DE USO:

- ✓ Altura de aspiración manométrica hasta 7 m
- ✓ Temperatura del líquido de -10 °C hasta +90 °C
- ✓ Temperatura ambiente de -10 °C hasta +40 °C
- ✓ Presión máx. en el cuerpo de la bomba 10 bar



Figura 19. Bomba de agua

2.3.3 Válvula proporcional

La Válvula de Control Proporcional Electrónica es una válvula de control proporcional electromagnética diseñada para su uso en sistemas de control de presión o de flujo cerrado.

Cuando se acopla con un sensor de flujo o un transductor de presión y un controlador electrónico proporcional es capaz de proporcionar un control constante y preciso de los caudales.

El Modelo Denmarck de Danfoss es una válvula accionada por corriente continua, normalmente cerrada, que incluye un asiento de válvula elastomérico para proporcionar un cierre hermético a las burbujas.

Una amplia gama de coeficientes de flujo (Cv's) está disponible tanto para el flujo como para el control de la presión.

Estas válvulas llenan el espacio vacío entre las electroválvulas y las servoválvulas. Una válvula proporcional puede ajustarse electrónicamente para una serie de cargas sin necesidad de accionamientos hidráulicos.



Figura 20. Válvula proporcional



Figura 21. Bobina de válvula proporcional

Para el funcionamiento de la válvula proporcional las magnitudes de fuerza o posición como señal de entrada a la válvula, resultan en un determinado caudal o presión. Esto le permite al sistema, generar una función analógica de sentido de marcha, velocidad o fuerza. Simultáneamente se puede fijar la variación en función del tiempo.



Figura 22. Partes internas de válvula proporcional

Fuente: <http://files.danfoss.com>

Editado por: Freddy Coloma – Antonio Prieto

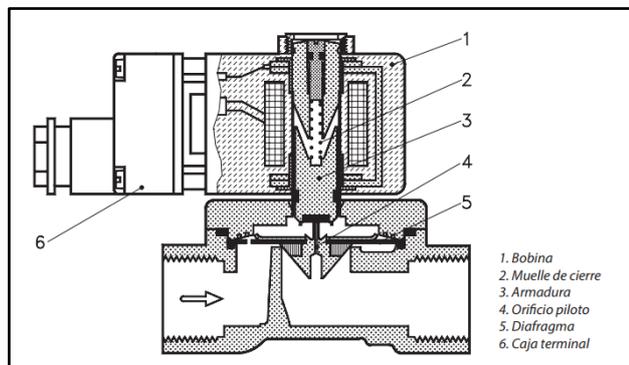


Figura 23. Ubicación de partes internas de válvula proporcional

Fuente: <http://files.danfoss.com>

Editado por: Freddy Coloma – Antonio Prieto

La figura 23. Muestra una válvula básica con solenoide proporcional que suministra un control remoto del caudal hidráulico, las válvulas proporcionales son válvulas de corredera deslizante, esta corredera está centrada por muelles (resortes), o con retorno con muelles.

La corredera de la válvula se mueve proporcionalmente a la señal eléctrica aplicada a su solenoide la señal eléctrica se convierte en un movimiento mecánico de la corredera, el caudal de salida es proporcional al caudal de entrada.



Figura 24. Conexión de válvula proporcional

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO

El banco de prueba fue diseñado para otorgar al practicante y tutor todas las comodidades y facilidades para una mejor comprensión de los sistemas.

3.1.1 Diseño del banco

Para el diseño del banco se realizó un modelado en 3D en donde se halló las mejores ubicaciones de los componentes para su fácil acceso.

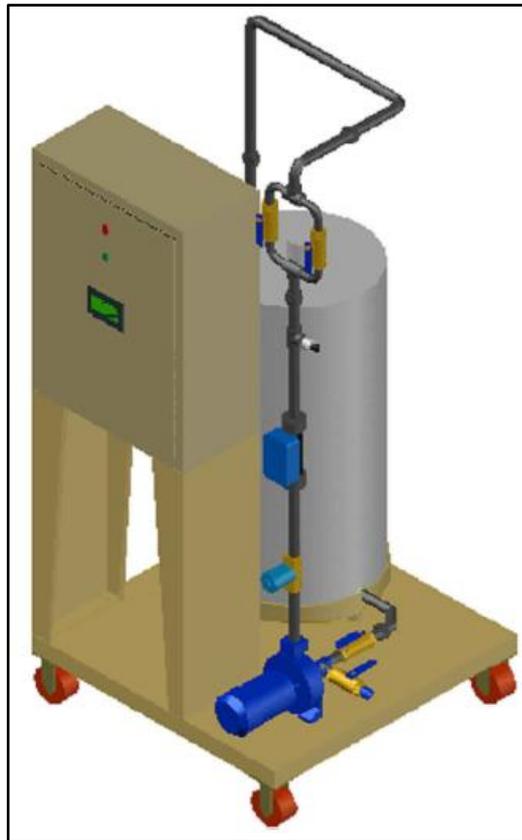


Figura 25. Modelo en 3D del banco

Las dimensiones del panel de control de banco son las que se muestran en la figura 26.

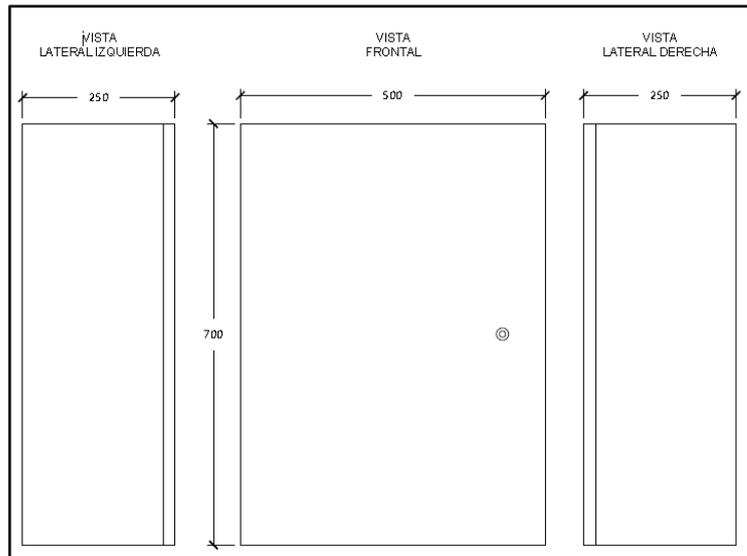


Figura 26. Medidas del banco de control

3.1.2 Ubicación de los elementos

Este banco cuenta con un tablero principal, de lado derecho se encuentran los sensores y actuadores y por la parte posterior se encuentra el tanque.



Figura 27. Vista lateral izquierda

El tanque tiene una capacidad de 110ltrs. Para estas pruebas se necesita que este tanque tenga como mínimo un 25% de su capacidad.



Figura 28. Ubicación de llaves de paso

Desde la parte superior derecha de la maqueta encontramos dos llaves de paso en paralelo los cuales sirven para simular la carga del sistema.

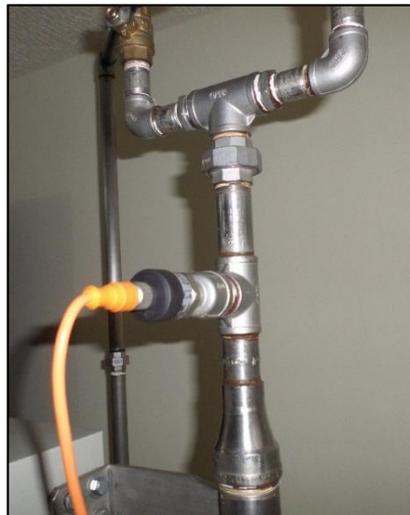


Figura 29. Sensor de presión

Siguiendo la misma línea encontramos el sensor de presión, su entrada de $\frac{1}{4}$ " y utiliza reductores de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ".



Figura 30. Sensor de flujo

Por debajo del sensor de presión se encuentra el sensor de flujo (figura 30) el cual tiene conexión de tubería de 1 ¼”.

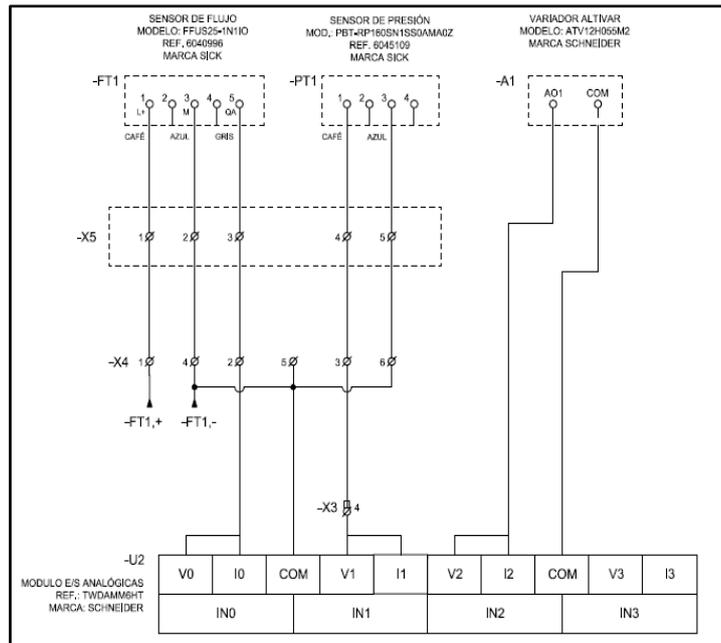


Figura 31. Conexión de los sensores de presión y flujo

El sensor de flujo tiene una alimentación directa de 24Vdc y una señal de referencia la cual se conecta al terminal V0 I0 de la entrada IN0, el sensor de presión tiene dos cables con los cuales envía la señal de referencia por lo que uno de ellos es colocado al negativo de la fuente y el otro a los terminales V1 I1 de la entrada IN1.



Figura 32. Válvula proporcional

La válvula proporcional tiene conexión 3/4", se encuentra después de la salida de la bomba y antes del sensor de flujo.

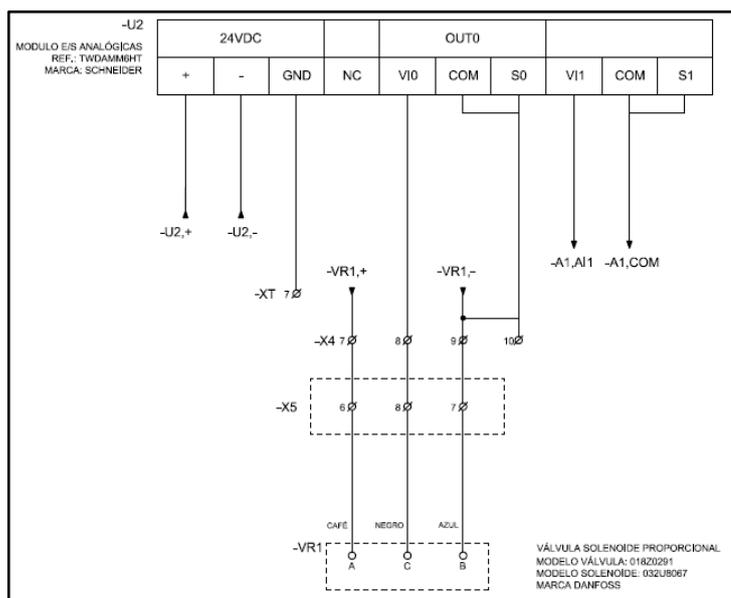


Figura 33. Conexión de la Válvula proporcional

La válvula proporcional se conecta a 24vdc y tiene una referencia que viene dada del PLC a través de su salida análoga VI0



Figura 34. Bomba de agua

La bomba se encuentra en la parte inferior del banco y es la encargada de suministrar el flujo y presión de agua al sistema. También tiene dos llaves de paso una para restringir el ingreso de agua al sistema y la otra para realizar purga del sistema.

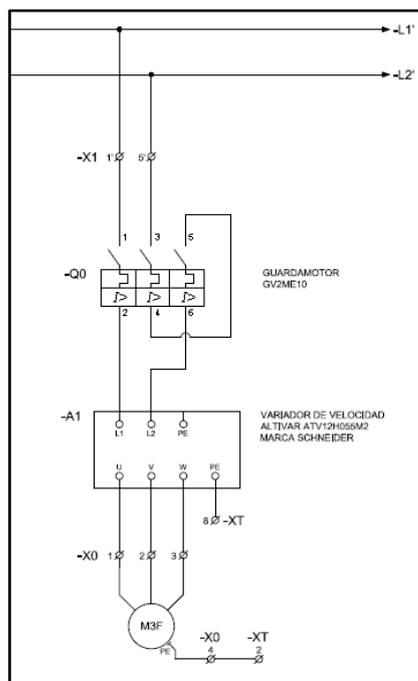


Figura 35. Conexión de la bomba de agua

La bomba está conectada a través de un variador altivar el cual nos permite controlar la velocidad de la misma pudiendo variar el flujo y presión del sistema.



Figura 36. Encendido y apagado del sistema

Para el encendido y apagado del banco se debe hacer girar un seccionador ubicado en la parte lateral izquierda.

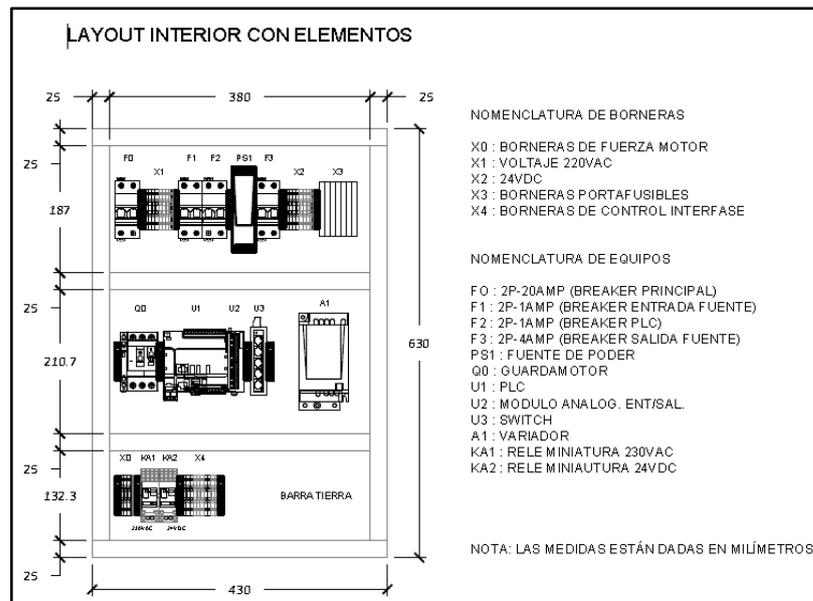


Figura 37. Distribución interna del tablero



Figura 38. Tablero eléctrico interno

Dentro del tablero eléctrico encontramos el driver, plc, switch, borneras, relé, breaker, fuentes y guarda motor.



Figura 39. Tablero eléctrico externo

Por la parte externa del tablero encontramos el botón de emergencia, el botón de encendido MCR y la pantalla táctil.

3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAZOS PID

Los lazos PID nos sirven para realizar el control de flujo o presión de una manera constante y sin variaciones bruscas. Si bien es cierto no existe un control PID con valores específicos que nos den el mejor resultado, a través de este banco podemos colocar estos valores para encontrar la mejor curva de funcionamiento del mismo.

Para este proyecto se realizaron 4 lazos PID los cuales se detalla a continuación.

3.2.1 Lazo PID control de flujo a través del variador

Para realizar el lazo PID del control de flujo a través del variador la variable medible es del sensor de flujo, este sensor envía las lecturas al control para realizar el aumento o disminución de la velocidad de la bomba.

Para realizar este control se deben tener consideraciones iniciales, las llaves de paso abiertas y la válvula proporcional abierta al 100%.

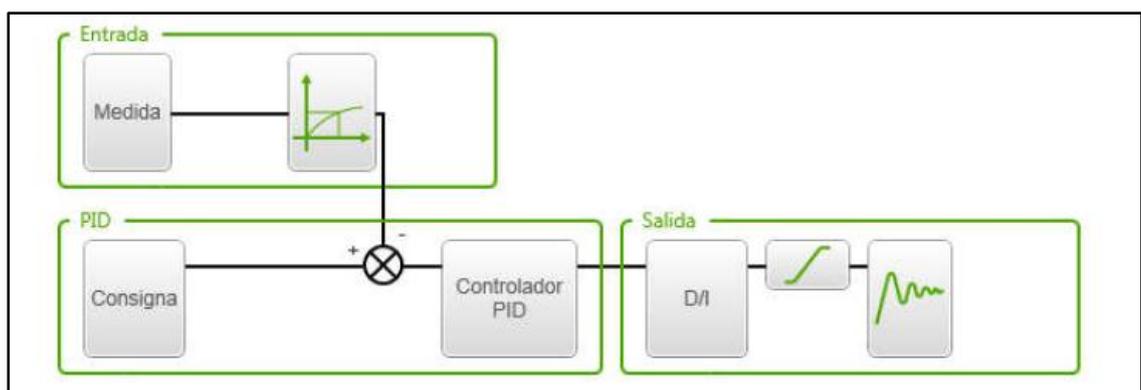


Figura 40. Lazo PID flujo - variador

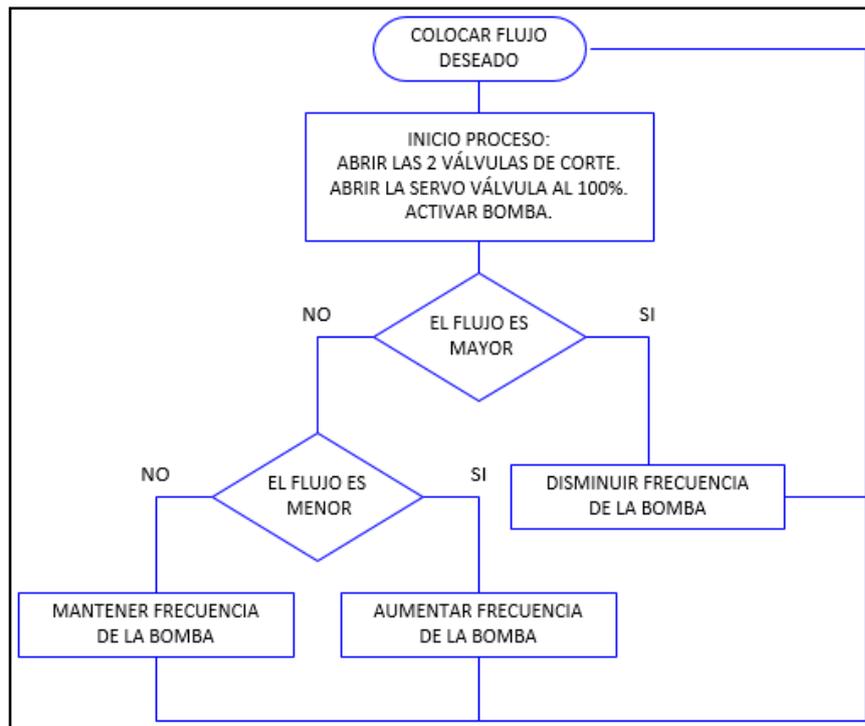


Figura 41. Diagrama de flujo del control de flujo a través de la bomba

La entrada del lazo lo hace convirtiendo la señal análoga a una palabra la cual tiene un ciclo de lectura de 100ms. Los parámetros del PID que son constantes k_p (x 0.01), t_i (x 0.1s) y t_d (x 0.1s) el muestreo es t_s (x10ms) = 10. Estas constantes son ingresadas por el usuario, dependiendo de estas variables el control lo realiza de manera rápida o lenta.

Su salida es inversamente proporcional a la entrada en donde sus límites son 1 a 4095, al verlo desde el driver se puede observar el aumento o disminución de la frecuencia.

3.2.1.1 Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación

Para realizar ésta perturbación, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvulas de corte 1 y 2, 100% abiertas
- Válvula proporcional 100% abierta
- Se configura el SP a 30lt/min

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	35
Ti	4
Td	1

Tabla 1. Datos Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación

Una vez que se pone en funcionamiento el sistema y se ha alcanzado el valor deseado del SP, se procede a realizar la primera perturbación:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se cierra 50% aproximadamente

Esto provoca una restricción de flujo como se aprecia en la gráfica, haciendo reaccionar al lazo a la recuperación del valor deseado de 30lt/min.

Luego de 20 segundos, se aplica la segunda perturbación:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se abre 100%

Como se puede apreciar, el sistema reacciona y recupera la operación al Set Point configurado de 30lt/min.

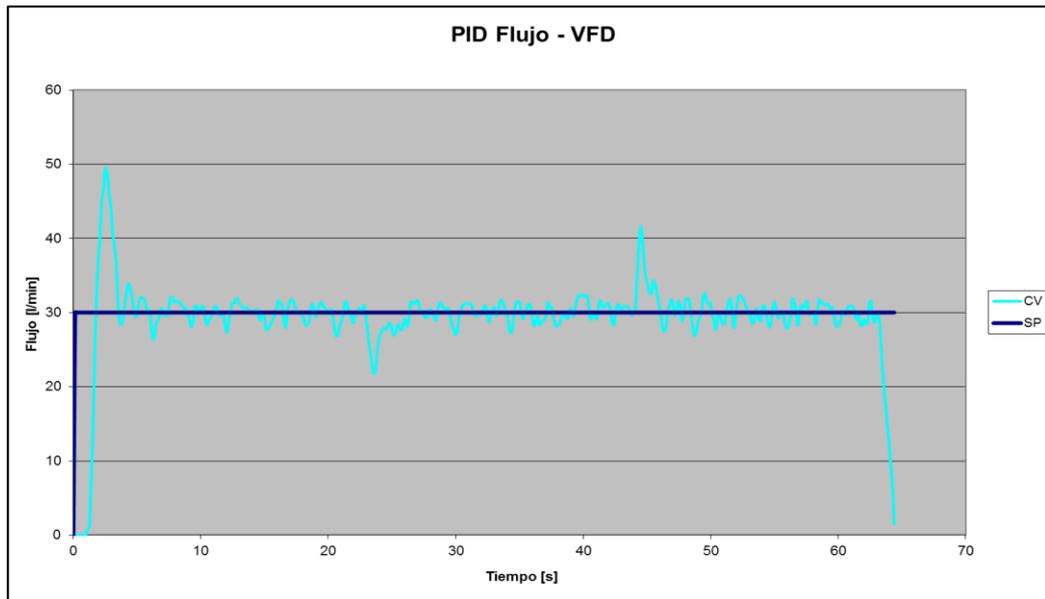


Figura 42. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador aplicando perturbación

3.2.1.2 Cálculo del Overshoot M_p (%) del sistema

$$M_p(\%) = \frac{Y(t_p) - Y_\infty}{Y_\infty} * 100\%$$

Donde:

- **$M_p(t_p)$** es el valor máximo en términos de porcentaje con respecto al valor de consigna o trabajo
- **$Y(t_p)$** es el valor de la salida alcanzado en el tiempo pico

$$Y(t_p) = 49.465 \text{ lt/min}$$

$$Y_\infty = 30 \text{ lt/min}$$

Por lo tanto:

$$M_p(\%) = \frac{49.465 - 30}{30} * 100\%$$

$$M_p(\%) = 64.88\%$$

3.2.1.3 Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point

Para realizar ésta variación de Set Point, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvulas de corte 1 y 2, 100% abiertas
- Válvula proporcional 100%

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	35
Ti	4
Td	1

Tabla 2. Datos Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point

Los Set Points a configurarse de forma manual para la operación del lazo son:

- SP #1 30 lt/min
- SP #2 45 lt/min
- SP #3 55 lt/min
- SP #4 25 lt/min

Como se aprecia en la gráfica, el lazo empieza a operar el control del PID alcanzando el valor del SP #1 de 30 lt/min, luego de 40 segundos se ingresa el SP #2 de 45 lt/min alcanzando el valor deseado y operando por 20 segundos bajo dicha consigna.

Posteriormente, procedemos con el ingreso del SP #3 de 55 lt/min, como se puede observar, el sistema llega al valor de consigna configurado pero se aprecia una ligera sobreoscilación comparado con el SP #2, debido a que en éste punto el sistema ya está en la zona inestable.

Y por último, aplicamos el SP #4 de 25 lt/min, como se observa, el lazo de control PID llega al valor deseado con una notable mínima sobreoscilación, debido a que el sistema está operando dentro de la zona lineal.

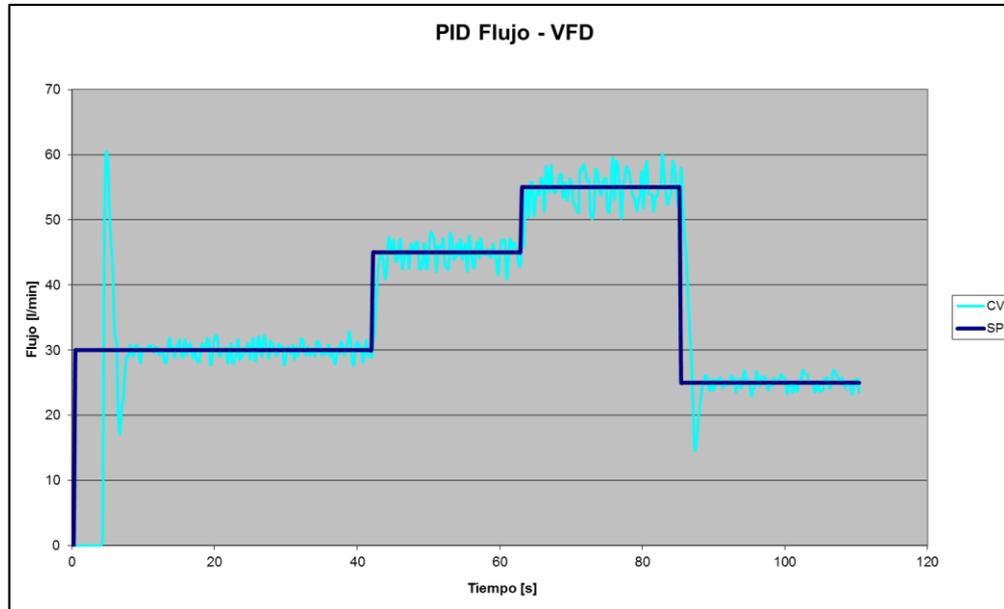


Figura 43. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Variador variando el Set Point

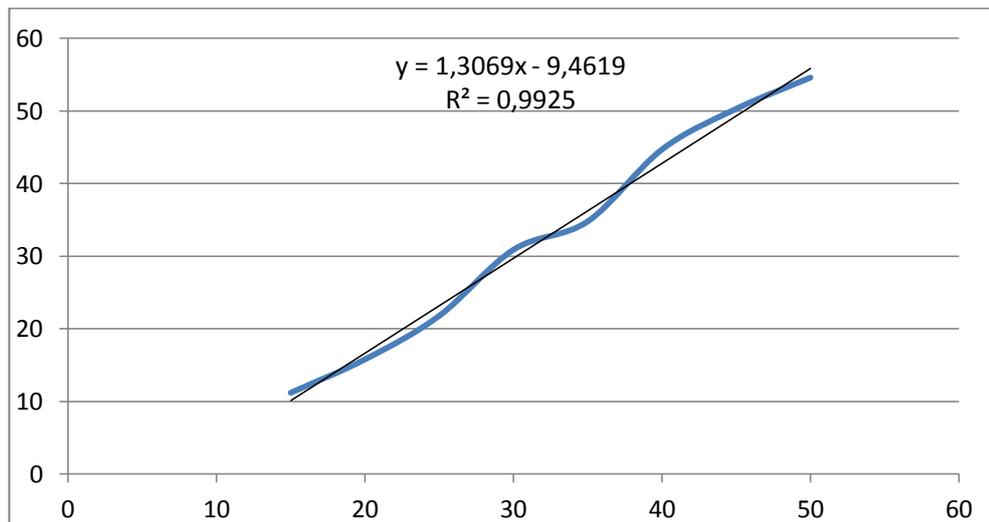


Figura 44. Gráfica de Linealidad PID de Flujo - Variador

3.2.2 Lazo PID control de presión a través del variador

Para realizar el lazo PID del control de presión a través del variador la variable medible es del sensor de presión, este sensor envía las lecturas al control para realizar el aumento o disminución de la velocidad de la bomba. Para realizar este control se deben tener consideraciones iniciales, una de las llaves de paso abiertas y otra cerrada y la válvula proporcional abierta al 100%.

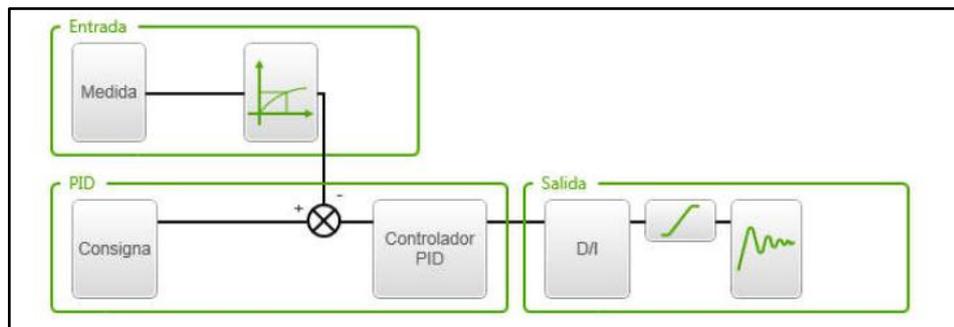


Figura 45. Lazo PID presión - variador

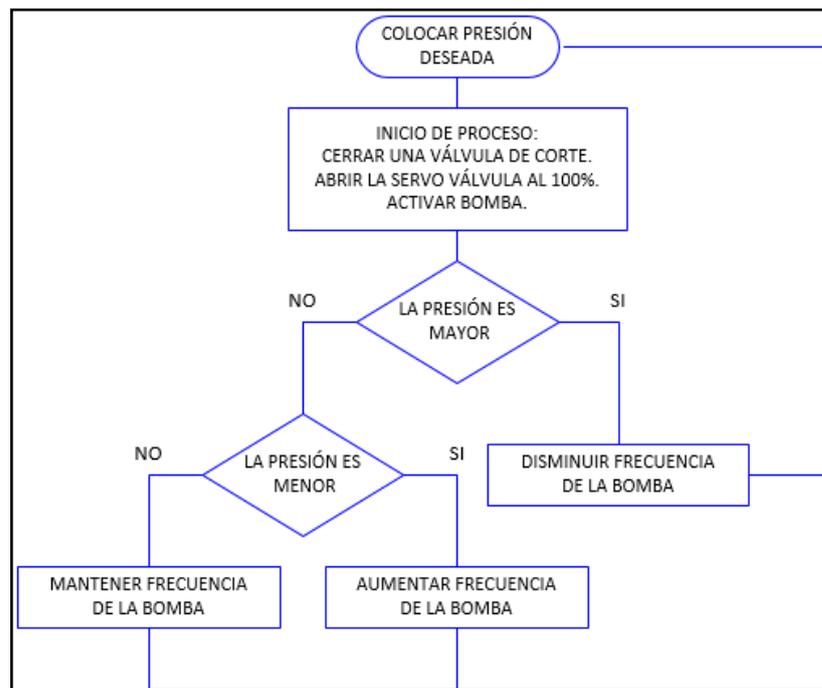


Figura 46. Diagrama de flujo del control de presión a través de la bomba

La entrada del lazo lo hace convirtiendo la señal análoga a una palabra la cual tiene un ciclo de lectura de 100ms. Los parámetros del PID que son constantes k_p (x 0.01), t_i (x 0.1s) y t_d (x 0.1s) el muestreo es t_s (x10ms) = 10. Estas constantes son ingresadas por el usuario, dependiendo de estas variables el control lo realiza de manera rápida o lenta.

Su salida es inversamente proporcional a la entrada en donde sus límites son 1 a 4095, al verlo desde el driver se puede observar el aumento o disminución de la frecuencia.

3.2.2.1 Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación

Para realizar ésta perturbación, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1, 100% abierta
- Válvula de corte 2, 100% cerrada
- Válvula proporcional 100% abierta
- Se configura el SP a 15 PSI

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	100
Ti	1
Td	1

Tabla 3. Datos Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación

Una vez que se pone en funcionamiento el sistema y se ha alcanzado el valor deseado del SP, se procede a realizar la primera perturbación a los 30 segundos aproximadamente:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se cierra 50%

Como se evidencia en la gráfica, hay un aumento de la presión a 19 PSI aproximadamente, y el sistema reacciona al lazo con la recuperación del valor deseado de 15 PSI en menos de 2 segundos.

Luego de 10 segundos, se aplica la segunda perturbación:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se abre 100%

Como es notorio, hay una disminución de presión de 11PSI, pero el sistema reacciona ante ésta perturbación, y en menos de 2 segundos, recupera la operación al Set Point configurado de 15 PSI

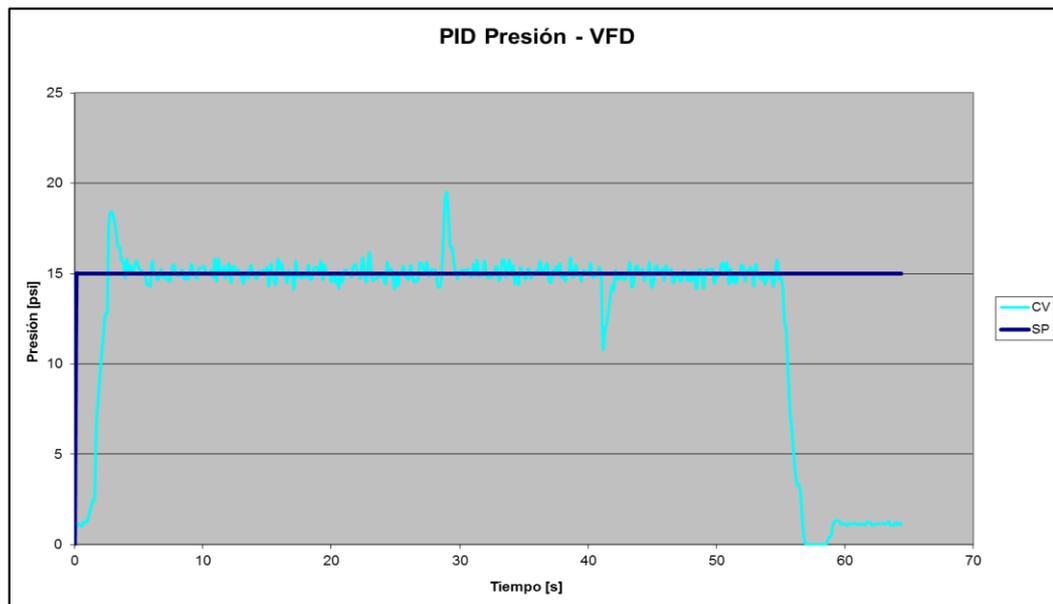


Figura 47. Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador aplicando perturbación

3.2.2.2 Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema

$$Mp(\%) = \frac{Y(tp) - Y_{\infty}}{Y_{\infty}} * 100\%$$

Donde:

- **Mp(tp)** es el valor máximo en términos de porcentaje con respecto al valor de consigna o trabajo
- **Y(tp)** es el valor de la salida alcanzado en el tiempo pico

$$Y(tp) = 18.40 \text{ PSI}$$

$$Y_{\infty} = 15 \text{ PSI}$$

Por lo tanto:

$$Mp(\%) = \frac{18.40 - 15}{15} * 100\%$$

$$Mp(\%) = 22.67\%$$

3.2.2.3 Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point

Para realizar ésta variación de Set Point, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1, 100% abierta
- Válvula de corte 2, 100% cerrada

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	100
Ti	1
Td	1

Tabla 4. Datos Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point

Los Set Points a configurarse de forma manual para la operación del lazo son:

- SP #1 10 PSI
- SP #2 15 PSI
- SP #3 20 PSI
- SP #4 10 PSI

Como se aprecia en la gráfica, el lazo empieza a operar el control del PID alcanzando el valor del SP #1 de 10 PSI, luego de 20 segundos se ingresa el SP #2 de 15 PSI alcanzando el valor deseado y operando por 20 segundos bajo dicha consigna.

Posteriormente, procedemos con el ingreso del SP #3 de 20 PSI, como se puede observar, el sistema llega al valor de consigna configurado pero con una ligera sobreoscilación, debido a que en éste punto el sistema ya se encuentra en la zona inestable.

Y por último, aplicamos el SP #4 de 10 PSI, como se observa, el lazo de control PID llega al valor deseado con una notable mínima sobreoscilación, debido a que el sistema está operando dentro de la zona lineal.

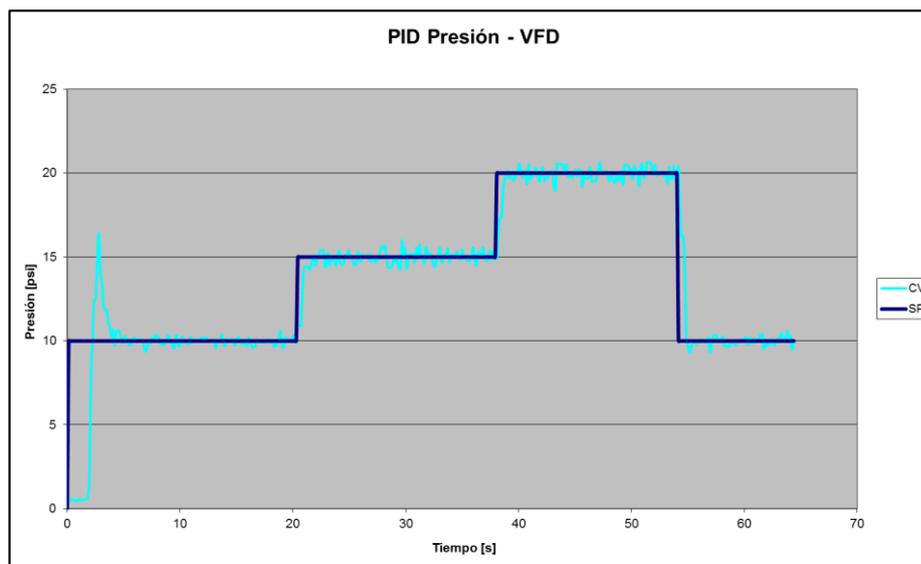


Figura 48. Gráfica de Lazo PID de Presión - Variador variando el Set Point

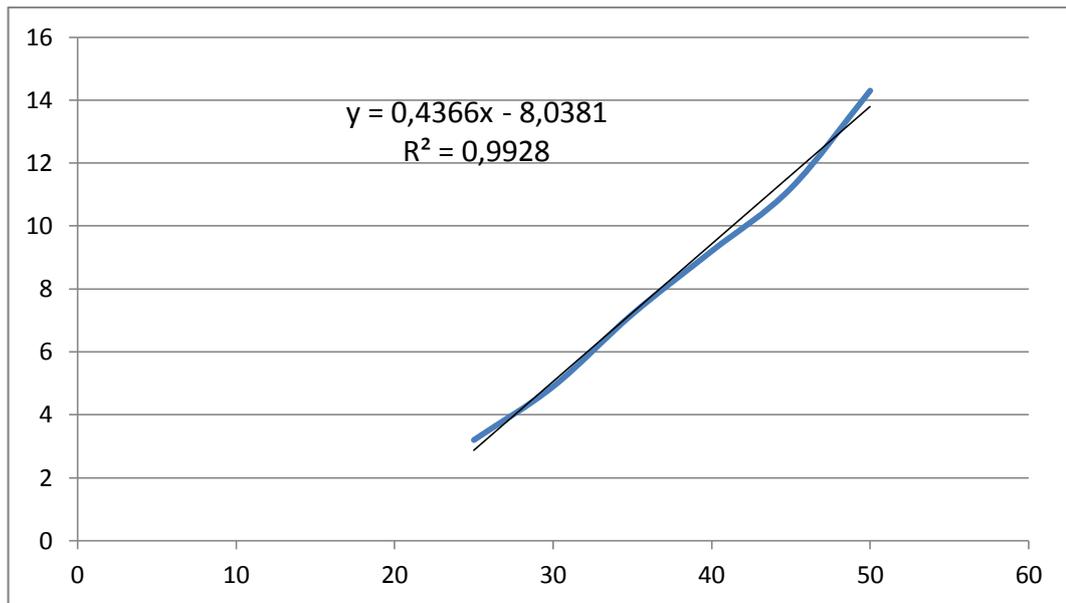


Figura 49. Gráfica de Linealidad de Presión - Variador

3.2.3 Lazo PID control de flujo a través de la servo válvula

Para realizar el lazo PID del control de flujo a través de la servo válvula la variable medible es del sensor de flujo, este sensor envía las lecturas al control para realizar el aumento o disminución de la apertura de la servo válvula. Para realizar este control se deben tener consideraciones iniciales, las llaves de paso abiertas y la bomba debe estar 100% es decir, la frecuencia a 60Hz.

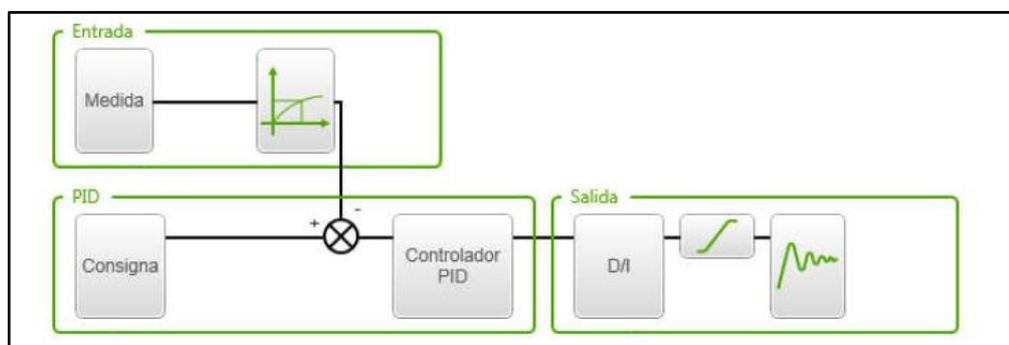


Figura 50. Lazo PID flujo – servo válvula

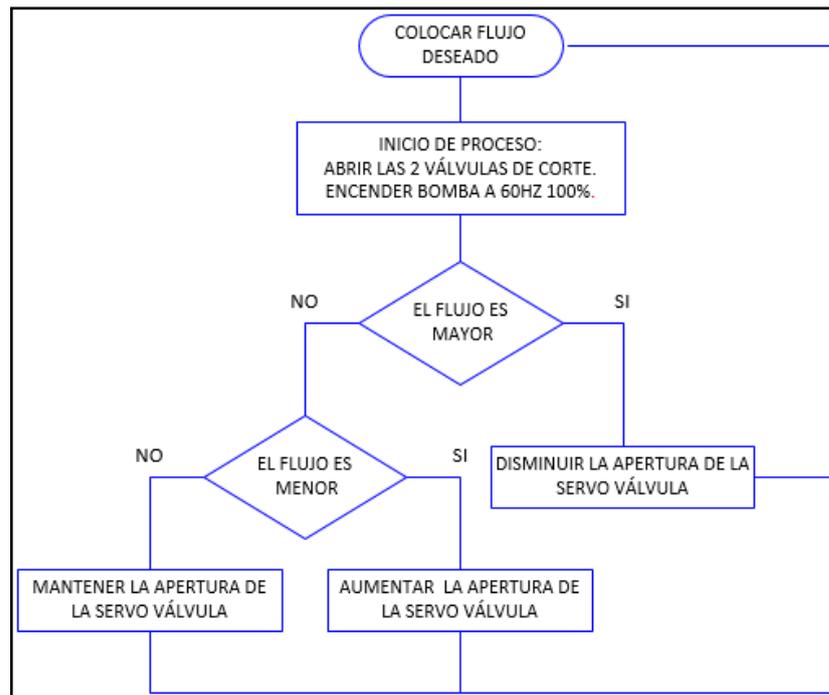


Figura 51. Diagrama de flujo del control de flujo a través de la servo válvula

La entrada del lazo lo hace convirtiendo la señal análoga a una palabra la cual tiene un ciclo de lectura de 100ms. Los parámetros del PID que son constantes k_p (x 0.01), t_i (x 0.1s) y t_d (x 0.1s) el muestreo es t_s (x10ms) = 10. Estas constantes son ingresadas por el usuario, dependiendo de estas variables el control lo realiza de manera rápida o lenta. Su salida es inversamente proporcional a la entrada en donde sus límites son 1 a 4095, al verlo desde la servo válvula se puede observar el aumento o disminución de la apertura de la misma.

3.2.3.1 Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación

Para realizar ésta perturbación, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1 y 2, 100% abierta
- Bomba 100% (60Hz)
- Se configura el SP a 30lt/min

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	35
Ti	4
Td	1

Tabla 5. Datos Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación

Una vez que se pone en funcionamiento el sistema y se ha alcanzado el valor deseado del SP, se procede a realizar la primera perturbación a los 25 segundos aproximadamente:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se cierra 50%, de manera lenta

Como se evidencia en la gráfica, hay una disminución del flujo asimismo de forma lenta, y reaccionando el lazo a la recuperación del valor deseado de 30lt/min a los 30 segundos.

Luego de 12 segundos, se aplica la segunda perturbación:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% cerrada
- Válvula de corte 2, se abre 100% de forma brusca

Como es notorio, hay un aumento de flujo brusco de 45 lt/min, pero el sistema reacciona ante ésta perturbación, y en menos de 2 segundos, recupera la operación al Set Point configurado de 30lt/min.

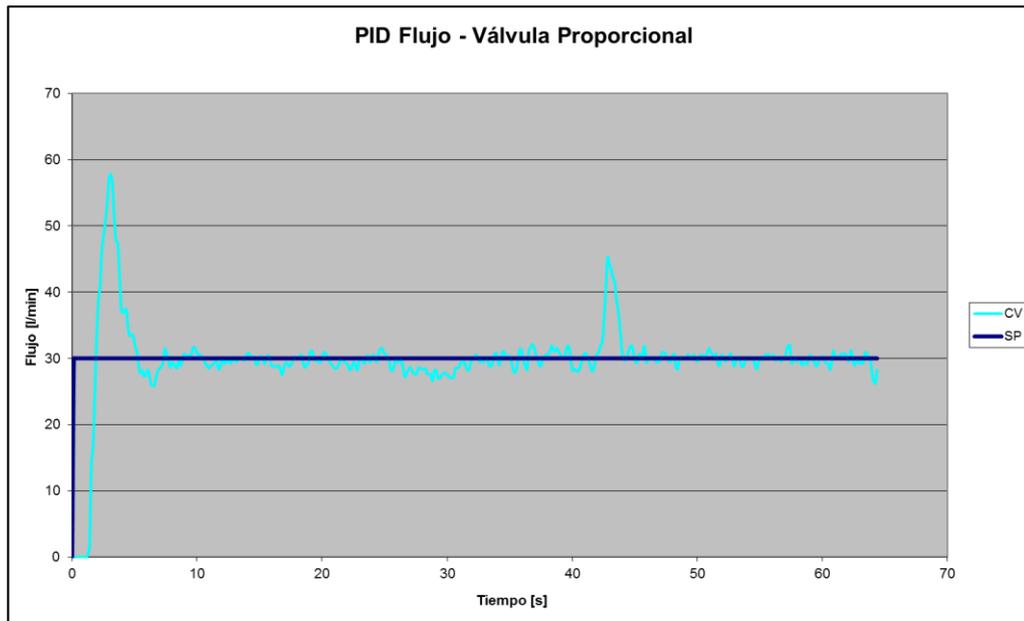


Figura 52. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula aplicando perturbación

3.2.3.2 Cálculo del Overshoot M_p (%) del sistema

$$M_p(\%) = \frac{Y(t_p) - Y_\infty}{Y_\infty} * 100\%$$

Donde:

- **$M_p(t_p)$** es el valor máximo en términos de porcentaje con respecto al valor de consigna o trabajo
- **$Y(t_p)$** es el valor de la salida alcanzado en el tiempo pico

$$Y(t_p) = 57.807 \text{ lt/min}$$

$$Y_\infty = 30 \text{ lt/min}$$

Por lo tanto:

$$M_p(\%) = \frac{57.807 - 30}{30} * 100\%$$

$$M_p(\%) = 92.69\%$$

3.2.3.3 Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point

Para realizar ésta variación de Set Point, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1 y 2, 100% abiertas
- Bomba 100% (60Hz)

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	80
Ti	7
Td	2

Tabla 6. Datos Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point

Los Set Points a configurarse de forma manual para la operación del lazo son:

- SP #1 30 lt/min
- SP #2 45 lt/min
- SP #3 55 lt/min
- SP #4 25 lt/min

Como se aprecia en la gráfica, el lazo empieza a operar el control del PID alcanzando el valor del SP #1 de 30 lt/min, luego de 30 segundos se ingresa el SP #2 de 45 lt/min alcanzando el valor deseado y operando por 25 segundos bajo dicha consigna.

Posteriormente, procedemos con el ingreso del SP #3 de 55 lt/min, como se puede observar, el sistema llega al valor de consigna configurado pero se aprecia una sobreoscilación comparado con el SP #2, debido a que en éste punto el sistema ya se encuentra en la zona inestable.

Y por último, aplicamos el SP #4 de 25 lt/min, como se observa, el lazo de control PID llega al valor deseado con una notable mínima sobreoscilación, debido a que el sistema está operando dentro de la zona lineal.

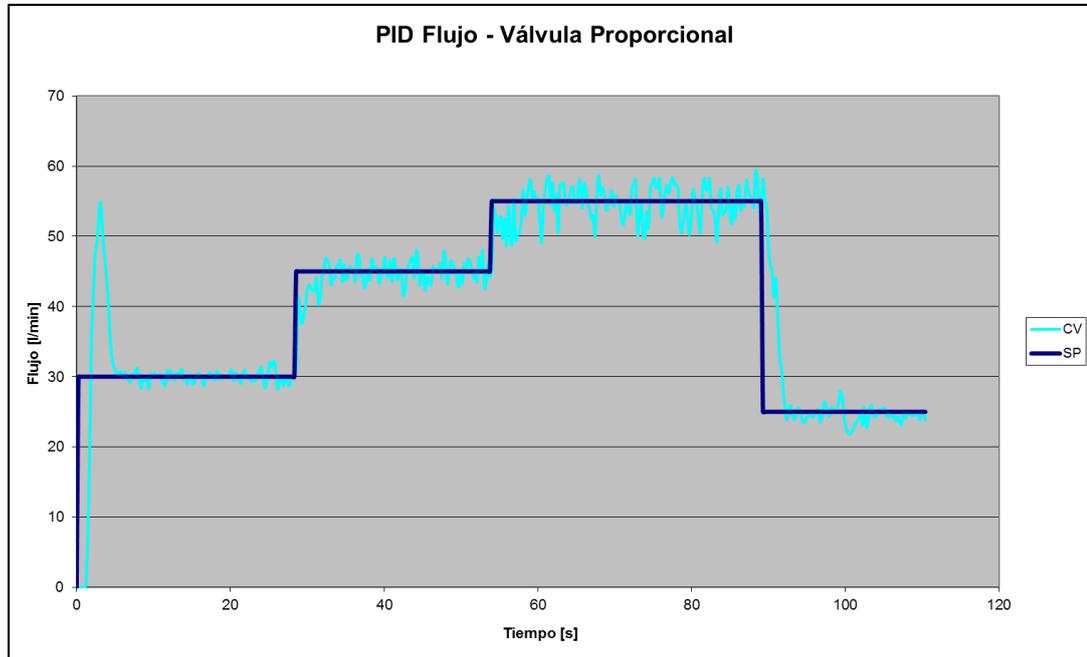


Figura 53. Gráfica de Lazo PID de Flujo - Válvula variando el Set Point

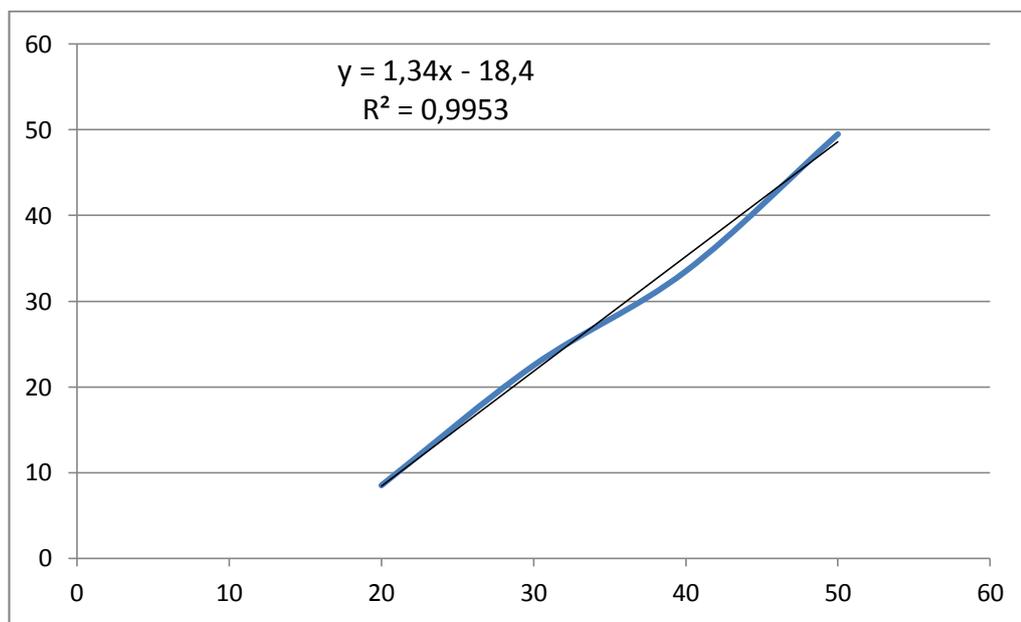


Figura 54. Gráfica de Linealidad de Flujo - Válvula

3.2.4 Lazo PID control de presión a través de la servo válvula

Para realizar el lazo PID del control de presión a través de la servo válvula la variable medible es del sensor de presión, este sensor envía las lecturas al control para realizar el aumento o disminución de la apertura de la servo válvula. Para realizar este control se deben tener consideraciones iniciales, una de las llaves de paso abiertas y otra cerrada y la bomba debe estar 100% es decir, la frecuencia a 60Hz.

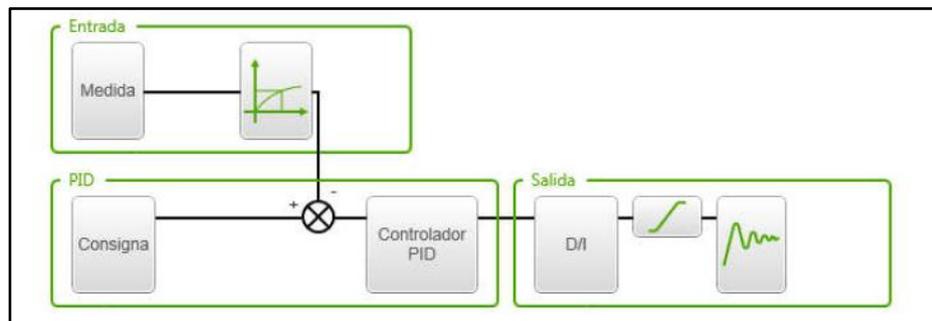


Figura 55. Lazo PID presión – servo válvula

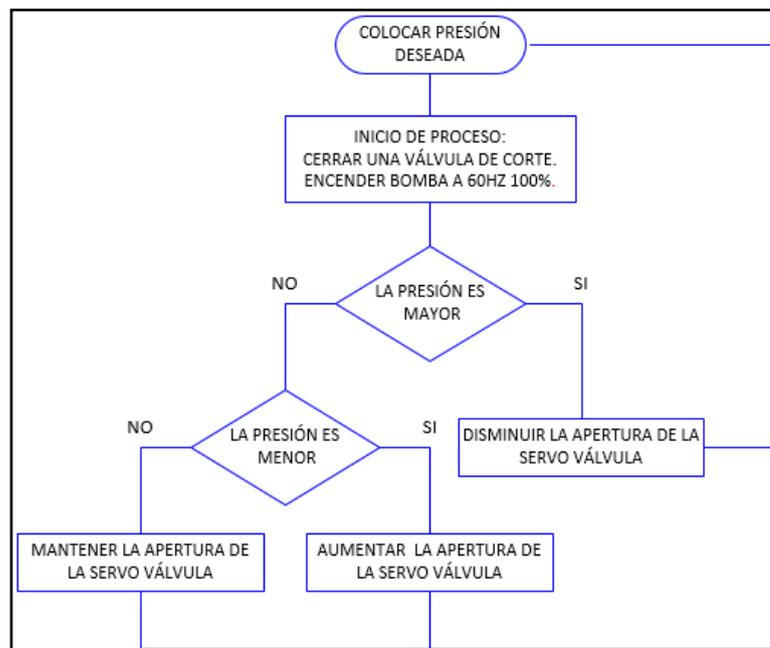


Figura 56. Diagrama de flujo del control de presión a través de la servo válvula

La entrada del lazo lo hace convirtiendo la señal análoga a una palabra la cual tiene un ciclo de lectura de 100ms. Los parámetros del PID que son constantes k_p (x 0.01), t_i (x 0.1s) y t_d (x 0.1s) el muestreo es t_s (x10ms) = 10. Estas constantes son ingresadas por el usuario, dependiendo de estas variables el control lo realiza de manera rápida o lenta.

Su salida es inversamente proporcional a la entrada en donde sus límites son 1 a 4095, al verlo desde la servo válvula se puede observar el aumento o disminución de la apertura de la misma.

3.2.4.1 Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación

Para realizar ésta perturbación, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1, 100 % abierta
- Válvula de corte 2, 50% cerrada
- Bomba 100% (60Hz)
- Se configura el SP a 15 PSI

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	100
Ti	1
Td	1

Tabla 7. Datos Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación

Una vez que se pone en funcionamiento el sistema y se ha alcanzado el valor deseado del SP, se procede a realizar la primera perturbación a los 22 segundos aproximadamente:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% abierta
- Válvula de corte 2, se cierra 50%

Como se observa en la gráfica, hay un aumento de presión alcanzando 20 PSI, y el sistema reacciona con la recuperación del valor deseado de 15 PSI en menos de 2 segundos.

Luego de 25 segundos, se aplica la segunda perturbación:

- Válvula de corte 1, se mantiene 100% cerrada
- Válvula de corte 2, se abre 100%

Como se ilustra en el gráfico, hay una disminución de presión llegando a un valor de 8 PSI, pero el sistema reacciona ante esta perturbación, y en menos de 2 segundos, recupera la operación al Set Point configurado de 15 PSI.

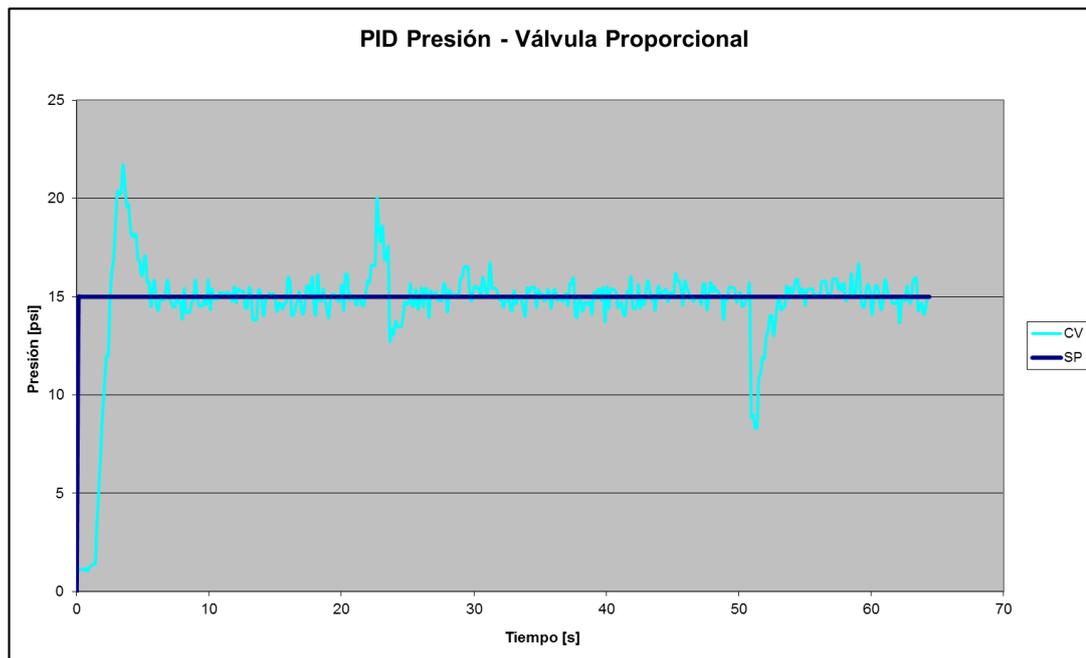


Figura 57. Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula aplicando perturbación

3.2.4.2 Cálculo del Overshoot Mp (%) del sistema

$$Mp(\%) = \frac{Y(tp) - Y_{\infty}}{Y_{\infty}} * 100\%$$

Donde:

- **Mp(tp)** es el valor máximo en términos de porcentaje con respecto al valor de consigna o trabajo
- **Y(tp)** es el valor de la salida alcanzado en el tiempo pico

$$Y(tp) = 21.72 \text{ PSI}$$

$$Y_{\infty} = 15 \text{ PSI}$$

Por lo tanto:

$$Mp(\%) = \frac{21.72 - 15}{15} * 100\%$$

$$Mp(\%) = 44.83\%$$

3.2.4.3 Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point

Para realizar ésta variación de Set Point, las condiciones iniciales del lazo son:

- Válvula de corte 1, 100% abierta
- Válvula de corte 2, 50% cerrada
- Bomba 100% (60Hz)

Las constantes PID son:

Constantes PID	
P	100
Ti	1
Td	1

Tabla 8. Datos Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point

Los Set Points a configurarse de forma manual para la operación del lazo son:

- SP #1 10 PSI
- SP #2 15 PSI
- SP #3 20 PSI
- SP #4 10 PSI

Como se aprecia en la gráfica, el lazo empieza a operar el control del PID alcanzando el valor del SP #1 de 10 PSI, a los 22 segundos se ingresa el SP #2 de 15 PSI alcanzando el valor deseado y operando por 16 segundos bajo dicha consigna.

Posteriormente, procedemos con el ingreso del SP #3 de 20 PSI, como se puede observar, el sistema llega al valor de consigna configurado pero con una ligera sobreoscilación, debido a que en éste punto el sistema ya se encuentra en la zona inestable.

Y por último, aplicamos el SP #4 de 10 PSI, como se observa, el lazo de control PID llega al valor deseado con una notable mínima sobreoscilación, debido a que el sistema está operando dentro de la zona lineal.

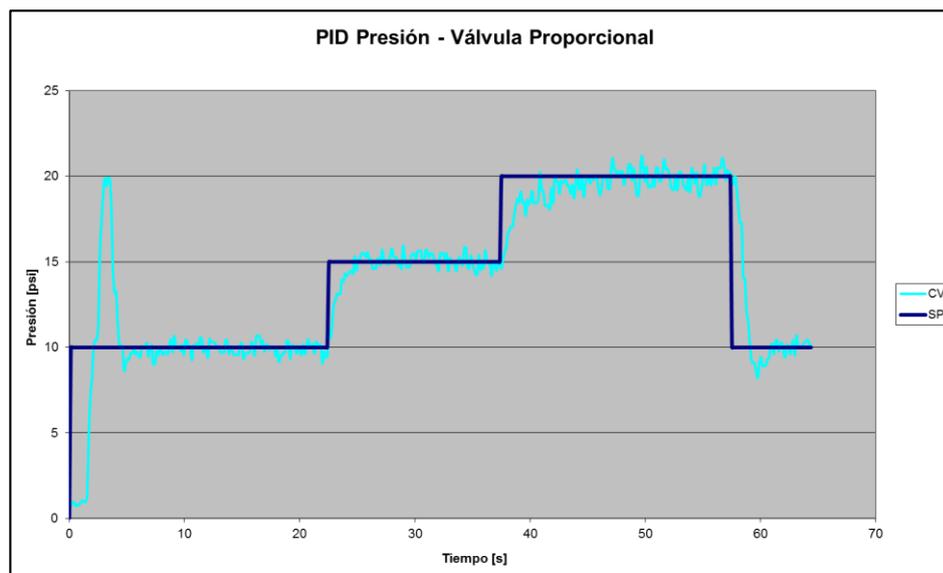


Figura 58. Gráfica de Lazo PID de Presión - Válvula variando el Set Point

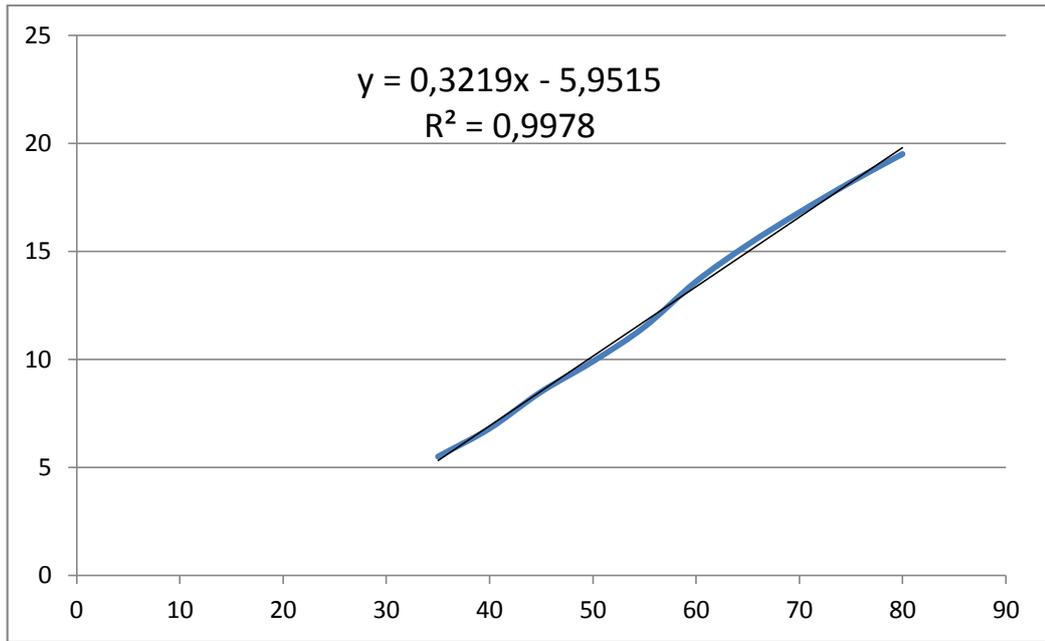


Figura 59. Gráfica de Linealidad Lazo PID de Presión - Válvula

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se encuentran la ubicación de cada elemento, condiciones iniciales y todas las pruebas realizadas en la maqueta, en lazo abierto y lazo cerrado

4.1.1 Condiciones iniciales

Para comenzar a realizar las pruebas se necesitan hacer las siguientes acciones.



Figura 60. Habilitación del MCR

Se debe pulsar el botón MCR el cual, al ser pulsado, permanecerá encendido hasta pulsar el botón de emergencia.



Figura 61. Nombre y clave para acceso

En la pantalla se puede observar que solicita un usuario y contraseña para ello tiene 2 niveles, el operador el cual permite la visualización y puntos de referencia de las variables.

El nivel de administrador permite además de la visualización y puntos de referencia, colocar los parámetros del PID del sistema.

Usuario	Contraseña
Admin	12345
Operador	12345

Tabla 9. Datos de usuario y contraseña



Figura 62. Nombre para acceso

Cuando se ingresa el nombre o contraseña aparece un teclado



Figura 63. Teclado de ingreso

Cuando ingresan la clave la misma aparecerá encriptado.

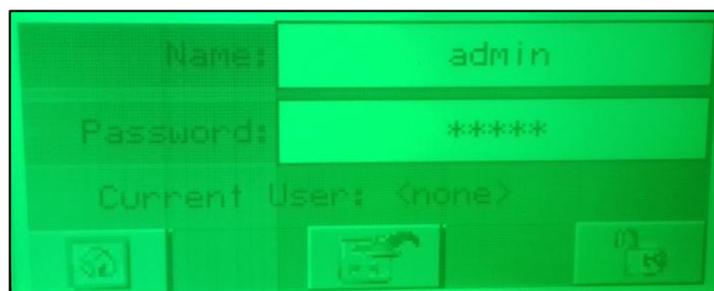


Figura 64. Ingreso de clave

Una vez que se ingresa aparecerá el menú principal el cual tiene 5 opciones de control las cuales son:

- ✓ Flujo – VFD el cual controla el flujo a través de la velocidad de la bomba
- ✓ Flujo – válvula el cual controla el flujo a través de la apertura de la válvula
- ✓ Presión – VFD el cual controla la presión a través de la velocidad de la bomba
- ✓ Presión – válvula el cual controla la presión a través de la apertura de la válvula
- ✓ Modo Manual-- el cual se puede realizar pruebas en lazo abierto



Figura 65. Menú principal

4.1.2 Pruebas de funcionamiento de lazo abierto

Pruebas con válvula abierta 100%		
VARIADOR [Hz]	FLUJO [l/min]	PRESION [psi]
0	0	0
5	0	0
10	0	0
15	11,2	1,4
20	15,8	1,7
25	21,8	2,1
30	30,9	3,6
35	34,8	5,2
40	44,7	8,6
45	50,3	9,4
50	54,6	11,3
55	60,4	13,7
60	63,4	14,6

Tabla 10. Datos de lazo abierto del variador

Para la toma de estos datos se colocó la válvula proporcional totalmente abierta y se fue aumentando el valor del variador de 5 en 5 Hz obteniendo los resultados de la tabla 2.

Como se puede observar, la frecuencia es directamente proporcional a la presión y flujo del sistema teniendo como mínimo un flujo de 11.2 l/min y una presión de 1.4 psi, así mismo nuestros datos máximos serán de 63.4 l/min y 14.6 psi.

Estos datos serán nuestra referencia al hacer los controles de lazo cerrado controlando por el variador.

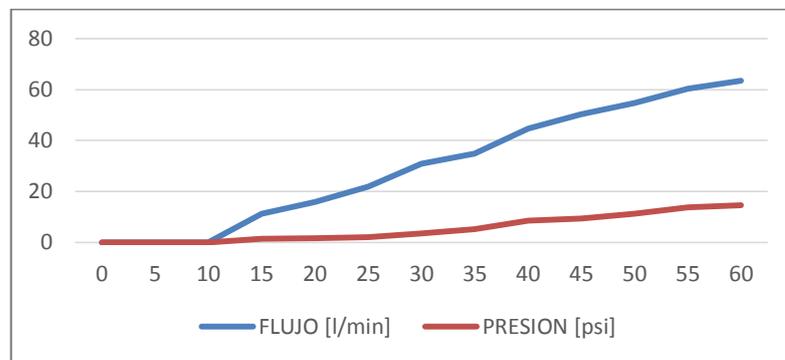


Figura 66. Curvas de flujo y presión a través del variador

Pruebas con frecuencia fija en 100%		
Válvula [%]	FLUJO [l/min]	PRESION [psi]
100	65,5	15,5
90	62,5	14,5
80	61,5	12,5
70	59,5	11,5
60	54,5	10,5
50	49,5	9,5
40	33,5	6,5
30	22,5	2,7
20	8,5	1,2
10	0	0
0	0	0

Tabla 11. Datos de lazo abierto del variador

Los datos de la tabla 3, son obtenido a través de la colocación del variador al 100% es decir, 60 Hz y se fue disminuyendo la apertura de la válvula de 10 en 10%.

Como se puede observar, la apertura de la válvula es directamente proporcional a la presión y flujo del sistema teniendo como mínimo un flujo de 8.5l/min y una presión de 1.2 psi, así mismo nuestros datos máximos serán de 65.5 l/min y 15.5 psi. Estos datos serán nuestra referencia al hacer los controles de lazo cerrado controlando por la servo válvula.

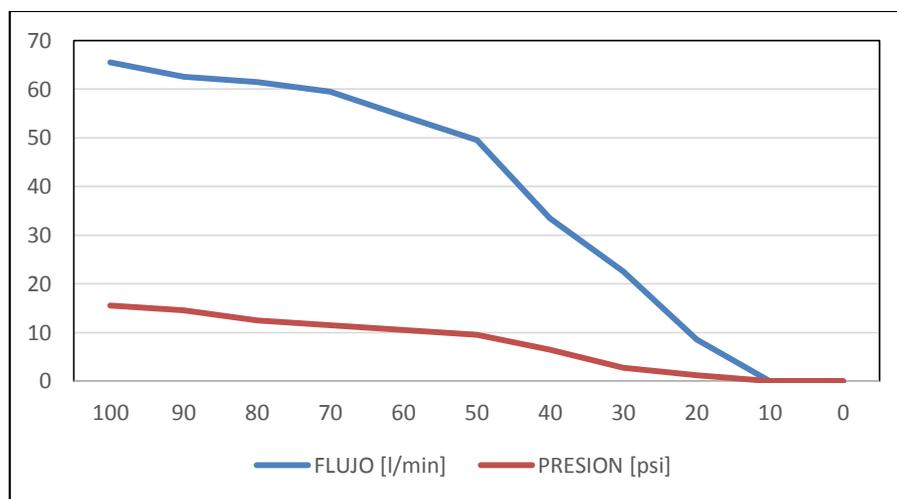


Figura 67. Curvas de flujo y presión a través de la servo válvula

4.1.3 Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Flujo – VFD

Para estas pruebas se debe escoger al tipo de control que se desea realizar.

Al escoger control de flujo por variador se puede observar que podemos modificar el punto deseado a lo que se requiera y las demás variables son de lectura.

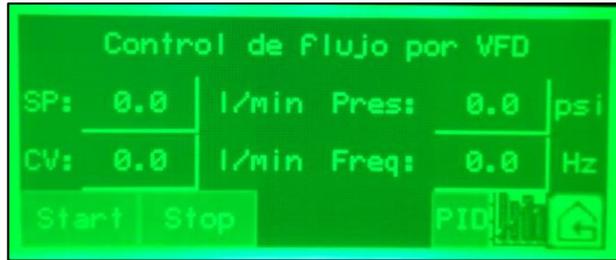


Figura 68. Control de flujo por VFD

Luego ingresamos a la pantalla del PID y colocamos las variables P, I y D

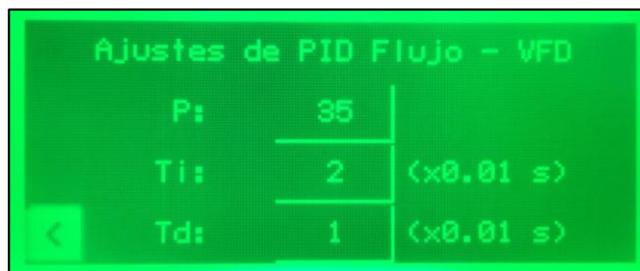


Figura 69. Ajuste de PID flujo – VFD

Una vez colocados los valores se debe pulsar el start para que inicie la operación del sistema.

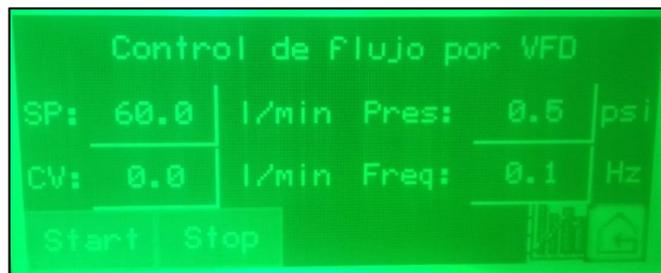


Figura 70. Ajuste de PID flujo – VFD

Para comprobar el desenvolvimiento del sistema PID escogemos el icono de gráfico y se puede observar la curva de funcionamiento del control y tiempo de estabilización

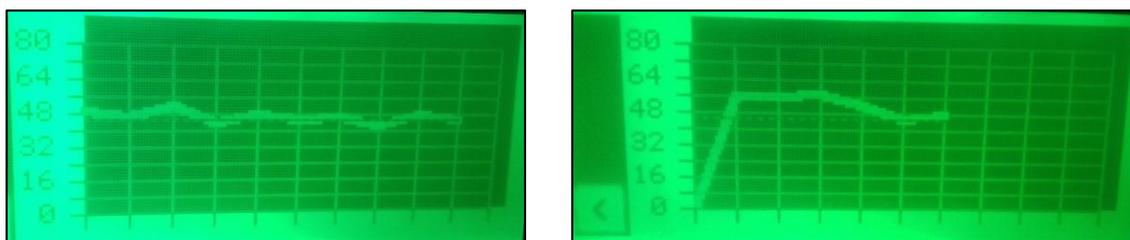


Figura 71. Curvas de funcionamiento del PID flujo – VFD

Cuando se desea salir de la pantalla actual y proceder a cambiar de valor en el lazo PID o realizar otro tipo de control, el sistema solicita que se detenga el proceso, es decir, pulsar el botón de stop de la pantalla, caso contrario aparecerá un mensaje indicando si desea detener el proceso

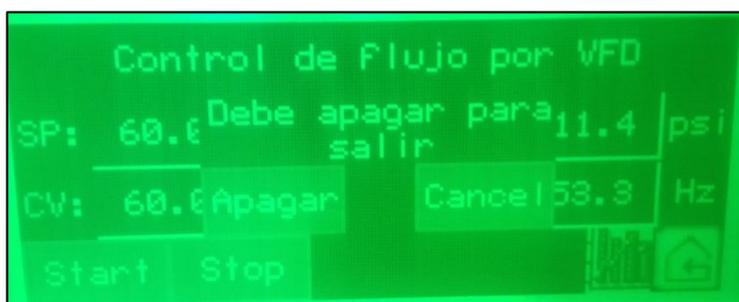


Figura 72. Salir del sistema de control

Como se puede observar en la figura 58 el arranque del variador genera una recta constante hasta lograr el nivel deseado, luego comienza a controlar la velocidad de la bomba para poder tener estabilidad en el flujo deseado, esto es gracias a los valores escogidos en el PID. A medida que cambiamos estas constantes la curva de estabilización se alarga o se acorta.

4.1.4 Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Flujo - Válvula

Al escoger control de flujo por válvula se puede observar que podemos modificar el SP a lo que se requiera y las demás variables son de lectura.

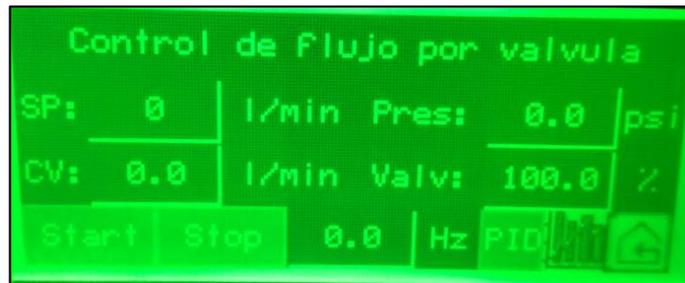


Figura 73. Control de flujo por válvula

Luego ingresamos a la pantalla del PID y colocamos las variables P, I y D

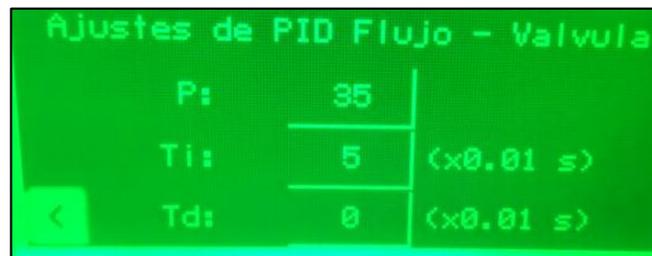


Figura 74. Control de flujo por válvula

4.1.5 Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Presión - Válvula

Al escoger control de presión por válvula se puede observar que podemos modificar el SP a lo que se requiera y las demás variables son de lectura.



Figura 75. Control de presión por válvula

Luego ingresamos a la pantalla del PID y colocamos las variables P, I y D

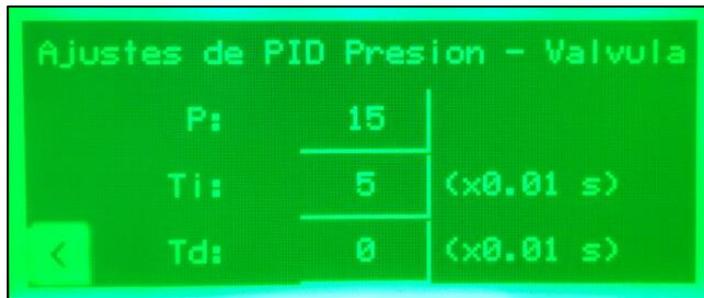


Figura 76. Ajuste de PID de presión por válvula

4.1.4 Pruebas de funcionamiento de lazo cerrado Presión – VFD

Al escoger control de presión por variador se puede observar que podemos modificar el SP a lo que se requiera y las demás variables son de lectura.

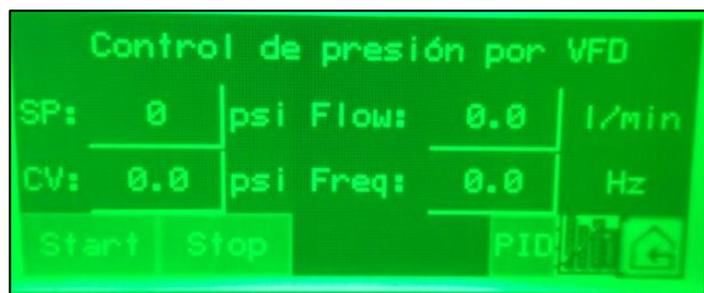


Figura 77. Control de presión por variador

Luego ingresamos a la pantalla del PID y colocamos las variables P, I y D

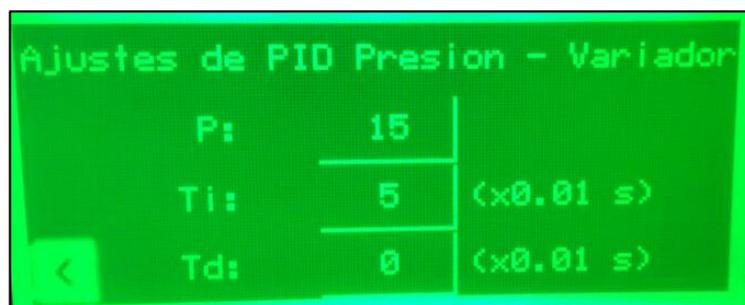


Figura 78. Ajuste de PID de presión por variador

CONCLUSIONES

- ✓ Al Investigar los métodos de control para operar lazos PID de presión y flujo, y determinar la instrumentación y equipos adecuados para realizar las pruebas respectivas se pudo comprobar el funcionamiento de los sensores y actuadores por separados. Al trabajar en conjunto se obtuvo resultados positivos, por lo que la buena selección de los implementos es primordial.
- ✓ El diseño y la implementación de lazos de control tipo PID para el control de la presión o flujo utilizando el Controlador Lógico Programable (PLC) fue un gran reto en la calibración e interpretación de las señales de los sensores. Es importante que el controlador a utilizar procese la información de los parámetros involucrados de una manera rápida y precisa.
- ✓ El diseño de la interfaz de usuario (HMI) para interactuar con el sistema ingresando los parámetros fue sencilla debido al software de programación de la pantalla, ya que es de fácil manejo.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar la limpieza del tanque cada 6 meses debido a que las impurezas en el agua pueden provocar daños en los sensores y actuadores.
- ✓ Los valores del PID deben ser ingresados dependiendo de los resultados deseados, es decir, colocar los valores, verificar los resultados obtenidos e irlos cambiando para mejorar las curvas.
- ✓ Para obtener mejores rangos de trabajo de presión se puede estrangular las llaves de paso para aumentar la presión del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Scneider. (16 de 06 de 2017). *www.schneider-electric.es*. Obtenido de Características del controlador Modicon M221, recuperadwww.schneider-electric.es/es/product-range/62128-controlador-logico---modicon-m221/

Tucamán, U. N. (02 de 2016). *catedras.facet.unt.edu.ar*. Obtenido de <https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeprocesos/wp-content/uploads/sites/85/2016/02/T6-Lazos-Tipicos-de-Control-de-Proceso-1.pdf>