



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
PROPUESTA TECNOLÓGICA

DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA

Propuesta tecnológica presentada previo a la obtención del Título de
INGENIEROS EN ELECTROMECAÁNICA

Autores:

Luis Marcelo Barrionuevo Paredes

Steven Javier Villamarín German

Tutor:

Ing. M.Sc. Luigi Orlando Freire Martínez

Latacunga – Ecuador

Marzo 2021



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Barrionuevo Paredes Luis Marcelo y Villamarín German Steven Javier, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: “DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA “, Siendo el Ing. M.Sc. Luigi Orlando Freire Martínez tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo 2021

Barrionuevo Paredes Luis Marcelo
C.I. 1600744310

Villamarín German Steven Javier
C.I. 1722618632



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA”, de los ponentes: Barrionuevo Paredes Luis Marcelo y Villamarín German Steven Javier, de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, considero que la Propuesta Tecnológica cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación del Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2021

Ing. M.Sc. Luigi Orlando Freire Martínez

C.I. 0502529589



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Barrionuevo Paredes Luis Marcelo y Villamarín German Steven Javier con el título de proyecto de titulación.

“DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2021

Lector 1 (Presidente)
PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso
C.I. 175836725-2

Lector 2
Ing. MSc. Jefferson Alberto Porras Reyes
C.I. 0704400449

Lector 3
Ing. MSc. Luis Miguel Navarrete López
C.I. 180374728-4



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

AGRADECIMIENTO

Agradecer en primera instancia a mi Madre quien me enseñó a ser un hombre de bien, por sus consejos y su ayuda que me brindo siempre, a mis hermanos por ser el eje primordial de este logro, por la confianza y apoyo durante todo este proceso académico.

Agradecer profundamente a mis formadores, Ing Luigi Freire e Ing. Paul Corrales por ese apoyo brindado en los momentos más duros que me ha tocado vivir, por la ayuda y guía ante los problemas que surgieron en mi formación académica.

Finalmente agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi, espacio que se convirtió en un segundo hogar, a sus autoridades y docentes quienes siempre estuvieron prestos a atender mis inquietudes y compartir sus vivencias profesionales. A mis amigos que conocí durante este espacio académico.

Marcelo Barrionuevo



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a mi madre Beatriz y a mi abuelita Carmen, que han sido el motor e inspiración dentro de este proceso, por nunca dejar que decayera en momentos difíciles y brindándome su apoyo incondicional, a mis hermanos Anthony y Matías que fueron mi motivación de continuar.

A mi padre Geovanny que a pesar de las adversidades nunca nos faltó alimento, a mi tío Aníbal por fomentarme desde pequeño el trabajo bien hecho y el esfuerzo constante, a toda mi familia que siempre me apoyo con mensajes de aliento.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi y sus docentes que han impartido sus conocimientos dentro de mi formación profesional con una educación de calidad.

De manera especial a mi tutor de tesis el ING. Luigi Freire por ser un excelente docente impartiendo sus conocimientos y consejos, al igual que el ING. Paúl Corrales, por ser piezas claves para culminar este proceso de titulación y por qué a más de brindar una relación estudiante docente, se convirtieron en amigos.

A mi compañero de tesis por la amistad creada durante el transcurso de la vida universitaria, a todos mis compañeros que supieron brindar sus conocimientos para poder superarme.

Steven Javier



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi madre Elena Paredes y mi hermano Agustín Barrionuevo quienes me acompañaron en todo el proceso de mi formación, por sus consejos y apoyo, quienes por infortunios de la vida hoy me acompañan desde el cielo, para mi hermano Joel por la confianza y ayuda que me ha brindado de forma incondicional.

Marcelo Barrionuevo



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Electromecánica

DEDICATORIA

El presente proyecto le dedico principalmente a mi madre Beatriz por todo el esfuerzo realizado para poder cumplir este sueño aquella que siempre me apoyo brindándome los valores correctos para poder tomar buenas decisiones, apoyándome en cada paso de manera emocionar nunca mostrando debilidad por mas cansada que este.

A mi abuelita Tuca que siempre me espera con un vaso de café cada que llegaba de la universidad y a toda mi familia que confiaron en mi esto es por ustedes.

A mis compañeros que encontré en este largo camino de estudio, lleno de altos y bajos pero que supieron brindar sus conocimientos de manera desinteresada para poder sobresalir en conjunto.

Steven Javier

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	i
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
AVAL DE TRADUCCIÓN	xvi
1. INFORMACIÓN BÁSICA.....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.1. Título de la propuesta tecnológica	2
2.2. Tipo de propuesta alcance	2
2.3. Área del conocimiento.....	2
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	3
2.5. Objeto de estudio y campo de acción.....	3
2.5.1. Objeto de estudio.....	3
2.5.2. Campo de acción.....	3
2.6. Situación problémica y problema	3
2.6.1. Situación problémica:	3
2.6.2. Problema	4
2.7. Hipótesis o formulación de preguntas directrices	4
2.8. Objetivo(s).....	4
2.8.1. Objetivo general	4
2.8.2. Objetivos específicos	4
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos.....	5
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Antecedentes	5
3.2. Sistema de Bombeo de agua	6
3.3. Sistema de presión constante de agua.....	6

3.4.	Bombas de agua.....	7
3.5.	Clasificación de las Bombas	8
3.5.1.	Carga neta positiva de sección	8
3.5.2.	Cavitación	9
3.5.3.	Motor eléctrico por que no son sincrónicos	9
3.6.	Selección del control del sistema de bombeo (Métodos de control de flujo)	11
3.7.	Automatización Industrial.....	13
3.8.	Sistemas de control.....	14
3.8.1.	Control de lazo abierto	14
3.8.2.	Control de lazo cerrado	15
3.8.3.	Elementos de un sistema de control de lazo cerrado.....	16
3.8.4.	Modos de Control en lazo cerrado	17
3.9.	Control proporcional integral derivativo.....	17
3.10.	Módulos didácticos para el control de procesos industriales	18
3.10.1.	Módulo didáctico para el control de presión	19
3.11.	Controladores lógicos programables (PLC)	19
3.11.1.	Componentes de un controlador lógico programable	20
3.12.	Variador de velocidad.....	21
3.13.	Sensores.....	22
3.13.1.	Sensor de presión.....	22
4.	METODOLOGÍA	24
4.1.	Descripción del proyecto.....	24
4.2.	Análisis estructural del módulo de entrenamiento.....	24
4.2.1.	Tanques	24
4.2.2.	Tuberías.....	26
4.3.	Estructura de banco de pruebas	26
4.4.	Selección de los componentes eléctricos y electrónicos del banco de pruebas	27
4.4.1.	Bomba.....	27
4.4.2.	Sensor de presión.....	29
4.4.3.	Variador de frecuencia	31
4.4.4.	Control lógico programable	33
4.4.5.	Interfaz hombre máquina.....	35
4.5.	Programación	36
4.6.	Programación del PLC	37

4.7.	Métodos de sintonización.....	39
4.7.1.	Estimación en lazo abierto.....	39
4.7.3.	Métodos de sintonización de lazo abierto.....	40
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
5.1.	Descripción del módulo de entrenamiento.....	43
5.2.	Análisis estructural	44
5.3.	Puesta en marcha del sistema.....	46
5.4.	Comportamiento del sistema.....	47
5.4.1.	Comportamiento del sistema a válvula abierta	47
5.4.2.	Comportamiento del sistema a válvula cerrada	48
5.4.3.	Curva de comparación de presión a válvula abierta y cerrada	49
5.4.4.	Errores de presión dentro del sistema.....	49
5.5.	Sintonización.....	50
5.5.1.	Línea de tendencia.....	50
5.5.2.	Sintonización método Lambda.....	51
5.5.3.	Comportamiento del sistema con valores de sintonización	53
5.5.4.	Tiempo de respuesta del sistema.....	54
5.6.	Rendimiento de la bomba.....	56
6.	PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS	59
6.1.	Presupuesto.....	59
6.1.1.	Gasto directo totales.....	59
6.1.2.	Gastos indirectos	59
6.1.3.	Análisis del VAN y TIR	60
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
8.	REFERENCIAS	63
9.	ANEXOS	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Objetivos y tareas propuestos.....	5
Tabla 3. 1. Clasificación de sensores	22
Tabla 3. 2. Clasificación de los dispositivos de control de presión	23
Tabla 4. 1. Características de los tanques	25
Tabla 4. 2. Características de la estructura del módulo.....	26
Tabla 4. 3. Características del acero ASTM A36	27
Tabla 4. 4. Matriz de criterios de tipos de bombas.....	28
Tabla 4. 5. Características de la bomba.....	28
Tabla 4. 6. Características del sensor de presión	30
Tabla 4. 7. Características del variador de frecuencia	31
Tabla 4. 8. Menú de configuración de los parámetros del variador de frecuencia	32
Tabla 4. 9. Identificación de número de entradas digitales al PLC	34
Tabla 4. 10. Identificación del número de entradas analógicas al PLC	34
Tabla 4. 11. Identificación del número de salidas analógicas del PLC	34
Tabla 4. 12. Características de entradas y salidas del PLC S7-1200	34
Tabla 4. 13. Características de pantalla HMI.....	35
Tabla 4. 14. Fórmulas para sintonización método Lambda	41
Tabla 5. 1. Comparación de límite elástico	45
Tabla 5. 2. Valores de sintonización calculado.....	53
Tabla 5. 3. Valores de sintonización robusto	53
Tabla 5. 4. Valores de sintonización agresivo	54
Tabla 5. 5. Tiempos de respuesta.....	54
Tabla 5. 6. Valores de altura y caudal del sistema	56
Tabla 5. 7. Valores de altura y potencia de la bomba	57
Tabla 6. 1. Gastos directos totales	59
Tabla 6. 2. Gastos indirectos totales	60
Tabla 6. 3. Calculo de VAN y TIR.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Curva de comparación entre un sistema de bombeo convencional y un sistema de presión constante.....	7
Figura 3. 2. Clasificación de bombas	8
Figura 3. 3.Fases del efecto de Cavitación en tuberías	9
Figura 3. 4. Sección transversal de un motor de inducción simplificado.....	10
Figura 3. 5. Número de polos de motores eléctricos	10
Figura 3. 6. Control on-off	11
Figura 3. 7. Control por estrangulamiento	11
Figura 3. 8. Control By-pass	12
Figura 3. 9. Control con variador de frecuencia.....	12
Figura 3. 10. Energía consumida por los diferentes métodos de control	13
Figura 3. 11. Control de lazo abierto.....	15
Figura 3. 12. Control lazo cerrado.....	16
Figura 3. 13. Diagrama de bloques de un control PID	18
Figura 3. 14. Estructura de un PLC.....	19
Figura 3. 15. Componentes de un PLC	20
Figura 3. 16. PLC modular.....	21
Figura 4. 1. Medidas del tanque de reserva y alimentación de agua para la bomba.	25
Figura 4. 2. Medidas del tanque depósito.....	26
Figura 4. 3. Diagrama de bloques de retroalimentación del sensor de presión en el sistema de control de lazo cerrado	29
Figura 4. 4. Señal de corriente de 4 – 20mA (2 cables)	30
Figura 4. 5. Señal de voltaje de 0.5 -4.5 V (3 cables)	31
Figura 4. 6. Diagrama de bloques de la función del variador de frecuencia en el sistema de control ..	31
Figura 4. 7. Conexión para valor de referencia de velocidad.....	32
Figura 4. 8. Diagrama de bloques del proceso de la recepción de la señal analógica	35
Figura 4. 9. Diagrama de bloques del proceso de control de la velocidad del motor.....	35
Figura 4. 10. Diagrama de flujo del sistema de bombeo a presión constante	36
Figura 4. 11. Set Point.....	37
Figura 4. 12. Normalizado y Escalamiento de señal analógica de entrada	37
Figura 4. 13. Normalizado y Escalamiento de señal analógica de salida.....	37
Figura 4. 14. Recepción de valores para control PID.....	38
Figura 4. 15. Configuración de valores máximos y mínimos	38

Figura 4. 16. Valores reales escalados	39
Figura 4. 17. Valor de trabajo de la bomba en porcentaje.....	39
Figura 4. 18. Sintonización de lazo abierto	40
Figura 4. 19. Sintonización de lazo cerrado	40
Figura 4. 20. Método de Ziegler Nichols	42
Figura 4. 21. Método de Miller	42
Figura 5. 1. Diagrama P&DI del sistema	44
Figura 5. 2. Diseño de la estructura del módulo a implementar.....	44
Figura 5. 3. Cálculo de tensión de Von Mises en un software de simulación.....	45
Figura 5. 4. Cálculo de deformación unitaria en un software de simulación	46
Figura 5. 5. Cálculo del factor de seguridad en un software de simulación.....	46
Figura 5. 6. Comportamiento a válvula abierta.....	47
Figura 5. 7. Comportamiento a válvula cerrada	48
Figura 5. 8. Curva de comparación del sistema a válvula abierta y cerrada	49
Figura 5. 9. Curva de errores de presión	50
Figura 5. 10. Línea de tendencia, presión y voltaje sensor.....	50
Figura 5. 11. Línea de tendencia, presión y voltaje sensor.....	51
Figura 5. 12. Curva de accionamiento de la bomba	52
Figura 5. 13. Tiempo de estabilización de la variable.....	52
Figura 5. 14. Curvas de sintonización PID robusto.....	53
Figura 5. 15. Curvas de sintonización PID Agresivo	54
Figura 5. 16. Curva de sintonización PID robusto y PID agresivo	55
Figura 5. 17. Curva de rendimiento de la bomba	56
Figura 5. 18. Curva de consumo eléctrico de la bomba	57
Figura 5. 19. Curva de operación de la bomba.....	58
Figura 5. 20. Curva de rendimiento.....	58

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA”

Autores: Barrionuevo Paredes Luis Marcelo

Villamarín German Steven Javier

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un módulo de bombeo a presión constante para la capacitación de personas que estén interesados en el área de automatización de procesos industriales mediante controladores lógicos programables (PLC). El proyecto consta de tres etapas, la primera etapa se centra en la búsqueda de información sobre los sistemas de bombeo de agua, sus elementos y los métodos que se aplican para su control, para lo cual se considera la búsqueda de antecedentes de modelos similares aplicados a esta área como punto de partida para la siguiente etapa. La segunda etapa se centra en el diseño y la construcción de dicho modelo, para lo cual se elabora planos, así como también se procede a realizar la simulación a través de un software para determinar su análisis estructural y el factor de seguridad del diseño, además, se determina los elementos estructurales, hidráulicos, eléctricos y electrónicos que hay en el mercado y que se requieren para realizar el módulo. Finalmente, la tercera etapa se centra en la evaluación del funcionamiento del módulo, para lo cual se desarrolla la programación de un Controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID) de presión en el PLC, la visualización y control del PID se lo realiza a través de una pantalla conocida como interfaz Hombre-Máquina (HMI), se realiza la calibración y acondicionamiento de la señal del sensor, se programa el variador de frecuencia para las condiciones en las que va a estar expuesto, se ejecuta todo el sistema y se registran los datos obtenidos para evaluar el funcionamiento del módulo.

Palabras Claves: HMI, Módulo, Presión Constante, PLC, PID, Sistema de Bombeo.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

THEME: "DESIGN OF A TRAINING MODULE FOR A CONSTANT PRESSURE WATER PUMPING SYSTEM FOR THE " CEPROIN "TRAINING CENTER IN LATACUNGA CITY"

Authors: Barrionuevo Paredes Luis Marcelo
Villamarín German Steven Javier

ABSTRACT

This research aimed to design a constant pressure pumping module for the training of people who are interested in the area of industrial process automation using programmable logic controllers (PLC). The project consists of three stages, the first stage focuses on the search for information on the water pumping systems, their elements and the methods that are applied for their control, it was considered the search for background information of similar applied models to this area as a starting point for the next stage. The second stage focuses on the design and construction of this model, for which plans are drawn up, as well as simulation was carried out through software to determine its structural analysis and the safety factor of the design, the structural, hydraulic, electrical and electronic elements that are on the market and that are required to make the module are determined. Finally, the third stage focuses on the operation evaluation of the module, thus, it was developed the programming of a Proportional, Integral and Derivative Controller (PID) of pressure in the PLC, the visualization and control of the PID is carried out through From a screen known as the Human-Machine Interface (HMI), the calibration and conditioning of the sensor signal is carried out, the frequency inverter is programmed for the conditions in which it will be exposed, the entire system is executed and recorded the data obtained to evaluate the operation of the module.

Keywords: HMI, Module, Constant Pressure, PLC, PID, Pumping System.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: BARRIONUEVO PAREDES LUIS MARCELO** y **VILLAMARÍN GERMAN STEVEN JAVIER**, cuyo título versa “**DISEÑO DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA A PRESIÓN CONSTANTE PARA EL CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN” EN LA CIUDAD DE LATACUNGA**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, marzo del 2021

Atentamente,

MG. NELSON GUAGCHINGA
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0503246415



1. INFORMACIÓN BÁSICA

Propuesto por:

Luis Marcelo Barrionuevo Paredes - Steven Javier Villamarín German

Tema aprobado:

Diseño de un módulo de entrenamiento para un sistema de bombeo de agua a presión constante para el centro de capacitación “CEPROIN” en la ciudad de Latacunga.

Carrera:

Ingeniería Electromecánica.

Director del Proyecto de Titulación:

Ing. M.Sc. Luigi Orlando Freire Martínez

Equipo de trabajo:

Tutor

Nombres: Luigi Orlando

Apellidos: Freire Martínez

Cédula de Identidad: 050252958-9

Email: luigi.freire@utc.edu.ec

Ponente 1

Nombres: Luis Marcelo

Apellidos: Barrionuevo Paredes

Cédula de Identidad: 160074431-0

Email: luis.barrionuevo4310@utc.edu.ec

Ponente 2

Nombres: Steven Javier

Apellidos: Villamarín German

Cédula de Identidad: 172261863-2

Email: steven.villamarin8732@utc.edu.ec

Lugar de ejecución:

Provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga, parroquia San Felipe

Tiempo de duración del proyecto:

6 meses

Fecha de entrega:

08/03/2021

Línea de investigación:

Procesos industriales

Sub líneas de investigación:

Automatización, control y protección de sistemas electromecánicos.

Tipo de propuesta tecnológica:

La propuesta tecnológica corresponde al diseño y construcción de un módulo de entrenamiento para pruebas de un sistema de bombeo de agua a presión constante, utilizando un sensor industrial que permitirá realizar una medición de presión dentro del sistema, obteniendo valores de medición que permitirán verificar su precisión y exactitud, con respecto a un punto de seteo.

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA**2.1. Título de la propuesta tecnológica**

Diseño de un módulo de entrenamiento para un sistema de bombeo de agua a presión constante para el centro de capacitación “CEPROIN” en la ciudad de Latacunga.

2.2. Tipo de propuesta alcance

- a) Multipropósito: el desarrollo de un módulo de entrenamiento permitirá generar habilidades técnicas, aplicando conocimientos de control y automatización que permitirán adquirir conocimientos teóricos y prácticos.

2.3. Área del conocimiento

Tomando como referencia a la norma CINE – UNESCO [1], se determina que las áreas de conocimiento del proyecto son:

Campo amplio

330000 CIENCIAS TECNOLÓGICAS

Campos específicos

- 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas

Campo detallado

- 330602 Aplicaciones Eléctricas
- 3306.06 Fabricación de Equipo Eléctrico
- 3311 Tecnología de la instrumentación
 - 3311.05 Equipos Eléctricos de Control

- 3311.06 Instrumentos Eléctricos
- 3311.25 Bombas y Equipos Para Manipulación de Líquidos

2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica

Creación de un módulo para el entrenamiento del personal dentro del campo de control y automatización, donde puedan expresar sus dudas y adquirir conocimientos de la instalación y funcionamiento de los sistemas de bombeo a presión constante (Transductores, Controladores lógicos programables y Variadores de frecuencia).

En comparación con sistemas convencionales instalados, este sistema cuenta con un 35% más de costo inicial de instalación, según el diagrama de Pareto pero que lo compensa con el ahorro energético que tiene a mediano y largo plazo siendo la principal causa de ahorro el uso de arranques suaves y en escalera de bombas, reduciendo los picos generados por arranque de las mismas.

Una de las exigencias principales dentro de los condominios, hoteles, industrias y fabricas que requieren de agua para sus procesos es la presión constante dentro de sus sistemas hídricos, los procesos tradicionales de control de presión no garantizan que el fluido a bombear se mantenga a una presión constante, presenta un desgaste mayor en sus motores y facturas eléctricas elevadas ya que se mantiene siempre trabajando en su potencia nominal [2].

Los sistemas de bombeo están formados por un conjunto de elementos que cumplen la función de transportar a través de un sistema de tuberías un fluido, donde es necesario cumplir con los requerimientos que exija el proceso tanto de caudal y presión.

2.5. Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1. Objeto de estudio

Módulo de entrenamiento para el control de agua a presión constante

2.5.2. Campo de acción

Sistema de entrenamiento mediante el empleo de equipos de control e implementos eléctricos para la manipulación de presión de líquido dentro de la tubería por medio del control de una bomba eléctrica.

2.6. Situación problemática y problema

2.6.1. Situación problemática:

El continuo avance tecnológico dentro de las industrias en sistemas de bombeo de agua ha desplegado un amplio campo de personas busquen capacitación en el área técnica que

permitirán complementar sus conocimientos, en control y automatización con el uso de procesadores lógicos programables aplicando diversos principios a sistemas de bombeo de agua, ya que su conocimiento se ve limitado al no contar con módulos físicos para el desarrollo de sus conocimientos.

La existencia de centros de capacitación donde su impartición de conocimientos es en base a simulaciones realizándolas de esta manera por la inexistencia de módulos didácticos donde se pueda realizar prácticas físicas, así como la visualización de diversas fallas que pueden ocurrir al momento de la instalación.

Los sistemas tradicionales dentro de industrias, edificaciones, representan un alto consumo energético proveniente de arranques de bombas suministradoras de agua, siendo los sistemas de automatización el principal problema al no estar correctamente dimensionados para el trabajo que deben realizar, esto se debe a la poca capacitación que tienen diferentes técnicos a la hora de realizar una instalación de bombeo de agua.

En la actualidad las industrias y en las aplicaciones más comunes, los sistemas tradicionales son reemplazados por los controladores lógicos programables con la finalidad de optimizar los procesos [3].

2.6.2. Problema

La carencia de habilidades prácticas en profesionales en el manejo de sistemas de bombeo de agua a presión constante por medio de controladores lógicos programables.

2.7. Hipótesis o formulación de preguntas directrices

La creación de un módulo de entrenamiento de un sistema de bombeo de agua a presión constante para la empresa CEPROIN permitirá brindar capacitaciones a estudiantes y profesionales generando habilidades teóricas y prácticas.

2.8. Objetivo(s)

2.8.1. Objetivo general

Diseñar un módulo de bombeo de agua a presión constante para el entrenamiento de personal en el centro de capacitación “CEPROIN” en la ciudad de Latacunga.

2.8.2. Objetivos específicos

- Especificar las partes y métodos existentes de control utilizados en sistemas de bombeo de agua.
- Plantear el diseño del módulo de bombeo de agua y realizar su construcción.

- Evaluar el funcionamiento del módulo mediante la implementación de un controlador PID.

2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

Se relacionan cada objetivo con las tareas a realizar para el cumplimiento de los objetivos.

Tabla 2. 1. Objetivos y tareas propuestos

Objetivos	Tareas
Especificar los elementos y métodos existentes de control de un sistema de bombeo de agua.	Identificación de antecedentes de sistemas de bombeo.
	Identificación de bombas, tuberías, elementos hidráulicos.
	Búsqueda de elementos de control y automatización.
Plantear el diseño del módulo de bombeo de agua y realizar su construcción.	Elaboración de planos del módulo.
	Determinación de los equipos y elementos que se requieren
	Construcción del módulo y la implementación de los diferentes elementos del sistema de bombeo
Evaluar el funcionamiento del módulo mediante la implementación de un controlador PID.	Elaboración de la programación del controlador lógico programable (PLC).
	Configuración del sensor y sintonización del PID programado en el controlador lógico programable
	Análisis de datos recopilados

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

El desarrollo de la tecnología ha permitido realizar sistemas automáticos de alta precisión, dicho desarrollo implica que las personas necesitan prepararse para lograr la aplicación de estos desarrollos tecnológicos en sistemas industriales.

Los fluidos están presentes de forma directa o indirecta en los procesos industriales o a su vez permiten cumplir ciertos procesos, esto obliga a realizar sistemas de control, donde es necesario medir sus variables como la presión, el caudal entre otros, para luego realizar un control y lograr cumplir con el objetivo del sistema o el proceso en cuestión.

Se cita algunos trabajos realizados del control de presión constante en sistemas de bombeo de agua.

“Diseño y simulación de un módulo demostrativo con fines didácticos de un sistema de bombeo a presión constante de aplicación en edificios e industrias”[4], manifiesta que el módulo permitirá conocer a los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica el funcionamiento de los sistemas de bombeo a presión constante de uso residencial e industrial, así como también permitirá conocer la configuración de parámetros de los equipos y valores de la consigna.

“Diseño y construcción de un módulo didáctico con el PLC S7-1200 para la simulación de variación de presión de un fluido” [5], manifiesta que la implementación del módulo ayuda a desarrollar la destreza de programación para la automatización del proceso.

“Diseño e implementación de un prototipo de módulo didáctico de caudal para medir su influencia en el aprendizaje de la instrumentación y control industrial” [6], manifiesta que el módulo didáctico tuvo una influencia positiva en los resultados conceptuales en los cursos de instrumentación y control industrial, así como también tuvo influencia positiva en el rendimiento académico de los recursos de instrumentación y control industrial.

Los trabajos citados manifiestan que los módulos didácticos tienen una influencia positiva en la educación, donde los participantes pueden adquirir conocimientos prácticos sobre la configuración de equipos para la automatización de procesos industriales.

3.2. Sistema de Bombeo de agua

Los sistemas de bombeo permiten mover un fluido en determinada dirección y elevar la presión, donde los elementos principales que conforman un sistema de bombeo son las bombas, válvulas, tuberías y elementos de control electrónicos que se utiliza en la actualidad con la finalidad de obtener sistemas con mayor eficiencia.

Un sistema de bombeo transforma la energía mecánica producida en su mayoría por un motor eléctrico y la transforma en energía hidráulica que un fluido adquiere en forma de presión. Los sistemas convencionales por lo general tienen sistemas de bombeo de agua donde la bomba se mantienen en funcionamiento nominal [7].

3.3. Sistema de presión constante de agua

Existen diversos métodos para abastecer de agua a la residencia, institución o industria, donde la interacción de diferentes equipos o dispositivos permiten cumplir la demanda donde el uso de variadores de frecuencia permiten que las bombas trabajen en función de la demanda, lo que no sucede con los métodos tradicionales [8].

Los sistemas de presión constante de agua están diseñados para suplir la demanda cuando esta es variable, la red de distribución de agua debe ser constante (presión y caudal) independientemente de si la demanda aumenta o disminuye.

Las bombas en este tipo de sistema funcionan a una velocidad variable para suplir solo la demanda requerida, es decir si la demanda aumenta la bomba también aumenta su velocidad para mantener la presión establecida, y caso contrario si la demanda disminuye la bomba disminuye su velocidad para mantener la presión, para poder lograr este tipo de sistemas se requiere de un sistema de control automático para mantener una presión estable.

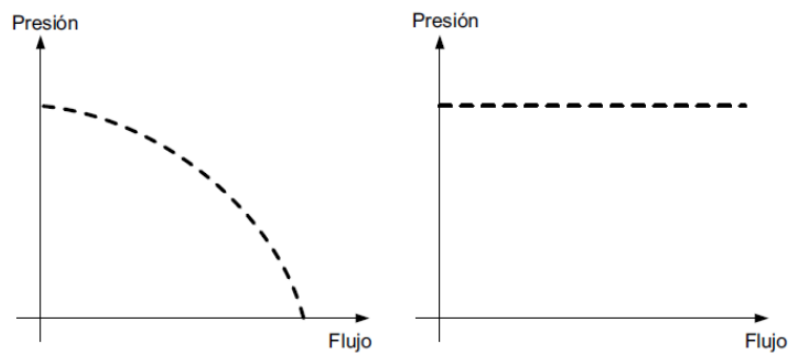


Figura 3. 1. Curva de comparación entre un sistema de bombeo convencional y un sistema de presión constante.

Fuente: [9]

Como se observa en la imagen se puede observar la curva del sistema de bombeo de agua convencional, donde la presión disminuye a medida que aumenta el flujo de agua, mientras que la segunda imagen muestra como la presión se mantiene estable a medida que el flujo de agua aumenta, lo que se conoce como sistema de presión constante [7].

3.4. Bombas de agua

Son aquellas máquinas que se usan para mover los diferentes tipos de fluidos, esto se logra debido a que la bomba aumenta la presión dentro de la tubería permitiendo que el fluido se mueva en el interior de las tuberías, cuyo fluido deben ser incompresible, la selección del tipo de bomba se lo realiza en función de la aplicación y del fluido a mover, también se debe considerar el medio en el que la máquina vaya a operar y las condiciones de operación que se requiere, existen una gran variedad de tipos de bombas y marcas, la aplicación para este trabajo se centra en la distribución de agua a presión constante mediante la variación de velocidad de la bomba [10].

3.5. Clasificación de las Bombas

La clasificación de las bombas permite reconocer los diferentes tipos de bombas existentes y la forma que estas desplazan el fluido. Esto permitirá conocer que bomba es la más eficiente para la aplicación que se requiere.

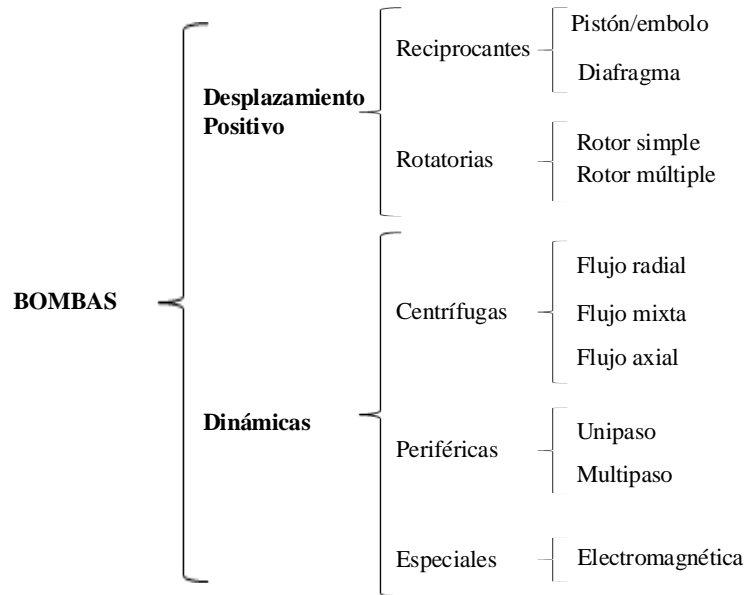


Figura 3. 2. Clasificación de bombas

Fuente: [11]

Se debe considerar que la especificación del material de la bomba debe ser compatible con el fluido a transportar. Para procesos donde se requiere una capacidad variable en determinado tiempo se utiliza un motor de velocidad fija y una bomba con propulsor, donde se utiliza una válvula de control para reducir el flujo cuando la demanda reduce su requerimiento, para sistemas donde la presión es importante se debe optar por una bomba de propulsión de velocidad variable.

La mayoría de sistemas de bombeo tienen una capacidad instalada del 10% al 15% más de la capacidad nominal requerida [7].

3.5.1. Carga neta positiva de sección

Todas las bombas vienen determinadas por el diseñador su carga neta positiva de sección NPSH, para ello se considera la velocidad de rotación, el número de álabes, diámetro de orificio del impulsor y el tipo de bomba. El NPSH se divide en el requerido y el disponible.

Esto permitirá determinar que la presión del fluido que se está bombeando no caiga por debajo de la presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo.

3.5.2. Cavitación

Este fenómeno se presenta cuando la presión del fluido decrece hasta la presión de saturación del fluido, generando vapor de agua cuyas burbujas o cavidades viajan con el fluido y explotan en zonas de mayor presión, estas explosiones causan daños a los diferentes elementos que conforman el sistema hidráulico. Se puede identificar la cavitación por los ruidos, vibraciones y desgastes que presente el sistema hidráulico.

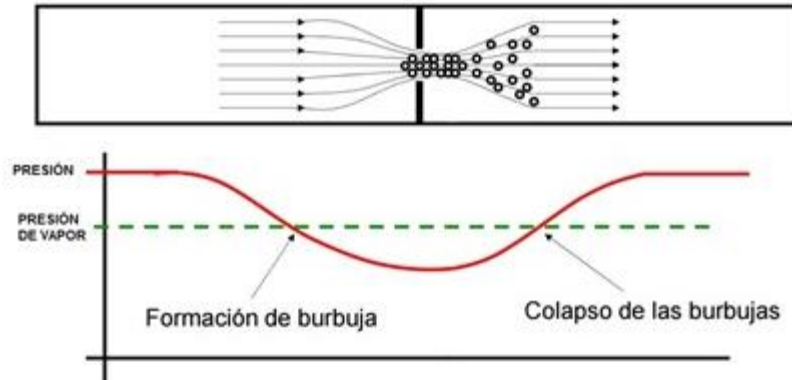


Figura 3. 3.Fases del efecto de Cavitación en tuberías

Fuente:[12]

La cavitación en las bombas se da en la sección del impulsor y como efecto de esto se produce la pérdida de eficiencia, así como la erosión del mismo, también la cavitación se asocia con el tipo de bomba, donde se debe considerar el diseño la tubería de succión, juntas descentradas, reducciones bruscas, puede contribuir a la cavitación, además a mayor velocidad nominal mayor o un caudal mayor al diseñado aumenta el riesgo de cavitación [13].

Para ello se debe realizar un análisis del NPSH de la bomba y del sistema para coordinar y poder evitar el fenómeno.

3.5.3. Motor eléctrico por que no son sincrónicos

El motor eléctrico es la máquina que realiza la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la interacción de los campos magnéticos generados en sus bobinas, está formado por el rotor y el estator. Es el dispositivo que entrega la energía mecánica a la bomba para pueda generar energía hidráulica y presión en el fluido [14].

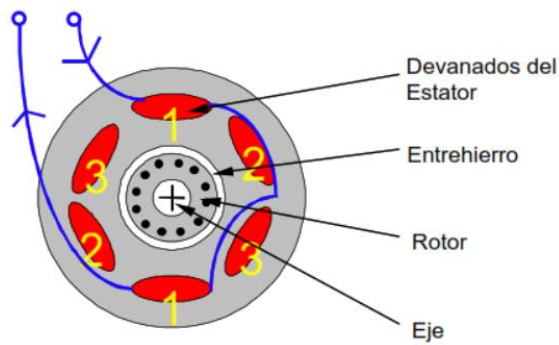


Figura 3. 4. Sección transversal de un motor de inducción simplificado

Fuente:[14]

Existen diferentes tipos de motores eléctricos, se los puede dividir en dos grupos los motores de corriente continua y los motores de corriente alterna, además de ello se puede encontrar motores de tipo monofásico y trifásicos, donde los motores monofásicos tienen la desventaja de que no se puede diseñar un control para regular la velocidad, mientras que en los motores trifásicos si permite realizar un control de velocidad.

Se conecta una fuente de energía a los devanados del motor, esto provoca que se genere un campo magnético rotatorio que se desliza a frecuencia de la fuente.

Cuando se agrupan los polos de los devanados se forman los pares, donde se aprecia que a mayor número de polos o pares la frecuencia del campo rotatorio disminuye.

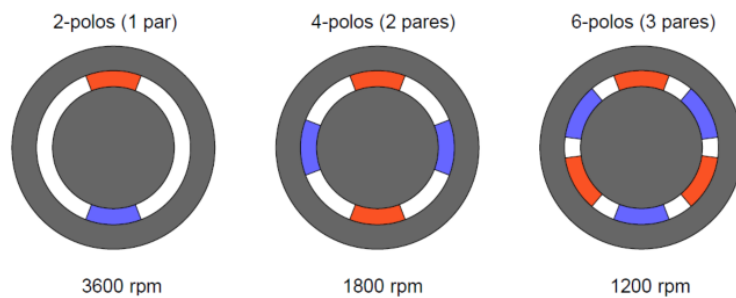


Figura 3. 5. Número de polos de motores eléctricos

Fuente:[7]

La velocidad del motor se lo puede determinar mediante la siguiente fórmula.

$$N = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ rpm}$$

(3. 1)

Donde:

N = Velocidad del motor

f = frecuencia de la fuente de alimentación

p = número de polos del motor

rpm = revoluciones por minuto

Por lo tanto, se puede observar que las velocidades del motor dependen directamente del número de polos del motor y la frecuencia de la red de alimentación [14].

3.6. Selección del control del sistema de bombeo (Métodos de control de flujo)

Existen diferentes métodos de para ejecutar el control de flujo de los fluidos, el método a seleccionar depende de la necesidad que se requiera suplir, entre los diferentes métodos existentes los más comunes son el control on-off, estrangulamiento, by-pass y mediante variador de frecuencia [7].

3.6.1. Control on-off: el motor de la bomba entra en funcionamiento a velocidad nominal y se enciende o se apaga de acuerdo al requerimiento del sistema.

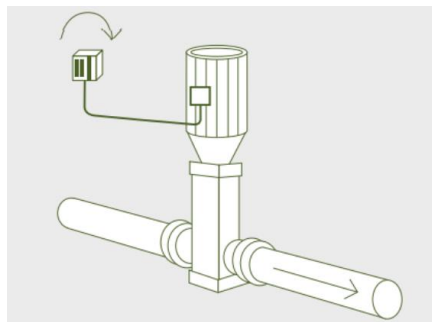


Figura 3. 6. Control on-off

Fuente:[7]

3.6.2. Control por estrangulamiento: el motor de la bomba entra en funcionamiento a velocidad nominal, donde el flujo del sistema es determinado mediante la apertura o cierre de la válvula.

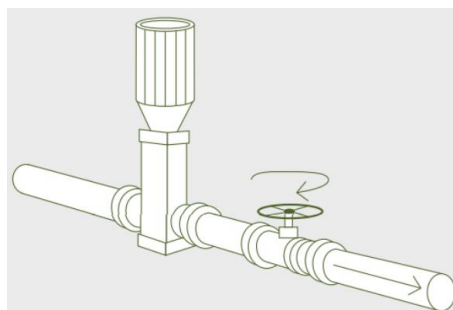


Figura 3. 7. Control por estrangulamiento

Fuente:[7]

3.6.3. Control By-pass: el motor de la bomba entra en funcionamiento a velocidad nominal, donde el flujo del sistema es determinado mediante la apertura o cierre de la válvula de by-pass.

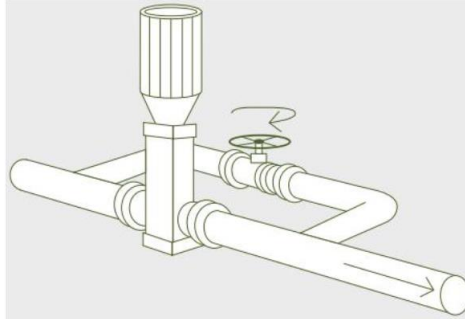


Figura 3. 8. Control By-pass

Fuente:[7]

Los métodos de control on-off, estrangulamiento y by-pass requieren que el motor de la bomba funcione a velocidad nominal, esto se da independientemente de la necesidad del sistema, siendo un sistema de baja eficiencia energética en proyectos de bombeo de demanda variable.

3.6.4. Control con variador de frecuencia: La velocidad del motor de la bomba funciona de forma variable en función de la cantidad de demanda requerida por el sistema.

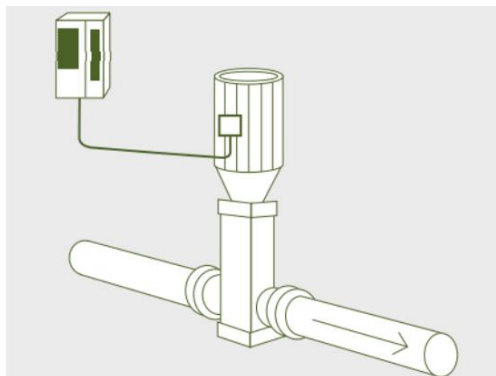


Figura 3. 9. Control con variador de frecuencia

Fuente:[7]

Para determinar la eficiencia del método de control de flujo se presenta la curva de potencia de la bomba a velocidad nominal que entrega un flujo (Q_1), adicional a ello se presenta un flujo menor (Q_2) el cual es el requerido por el sistema [7].

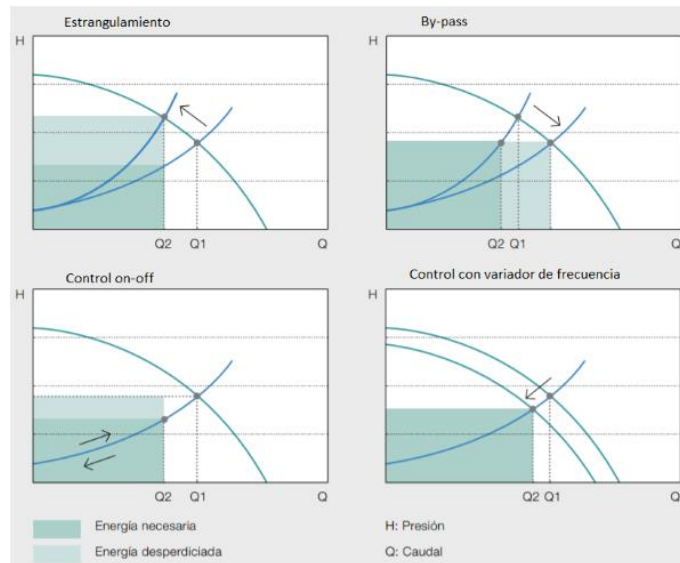


Figura 3. 10. Energía consumida por los diferentes métodos de control

Fuente:[7]

Mediante la imagen anterior se puede determinar que el método de control con variador de frecuencia depende de la demanda que tiene el sistema, lo que le hace un método más eficiente en comparación con los otros métodos antes mencionados. Esto también fue respaldado por Pesántez en su proyecto donde se demuestra que un sistema controlado por un variador de frecuencia trae un ahorro energético [15].

3.7. Automatización Industrial

La automatización industrial permite reducir al mínimo la intervención de los operarios en una máquina o en un proceso, se usa diferentes tecnologías para el control y monitoreo de las variables con la finalidad de conseguir que se cumpla con el trabajo designado, se automatiza por lo general tareas que son repetitivas. Es decir estas se encuentran susceptibles a ser programadas en su sistema de microprocesador y que cuenta con un lenguaje de programación [16].

La automatización busca lograr la mayor cantidad de producción a menor tiempo, con el objetivo de reducir costos y garantizar que la calidad sea uniforme en toda la producción.

La automatización industrial se encuentra presente en casi todos los sectores industriales, fabricación de vehículos, plásticos, productos farmacéuticos, alimentos, químicos entre otros, y que el proceso de automatizar no solo se lo aplica a las máquinas o procesos de fabricación, sino que también se aplica a la gestión de procesos, servicios, manejo de información con la finalidad de lograr un desempeño más eficiente. Esto también debido al desarrollo de la

tecnología de la información que ha incrementado la necesidad de aumentar la flexibilidad y reconfiguración en los procesos de manufactura [17].

3.8. Sistemas de control

Los automatismos y robots tienen la capacidad de iniciar un proceso y de detenerlo sin la necesidad de la intervención manual del operario, donde para realizar dicha función requiere de una información exterior, procesar dicha información para luego emitir una respuesta, a este proceso se lo llama sistemas de control. Este proceso se lo puede desarrollar en la actualidad gracias a la aparición de los microprocesadores, obteniendo los controladores lógicos programables que permiten el control, censado y el procesamiento de información tanto analógica como digital [18].

La información del exterior que percibe el sistema se lo conoce como señal de entrada o input, mientras que la información de salida que emita el sistema (actuación o no actuación de los actuadores) se lo conoce como señal de salida u output.

Los sistemas de control son de gran importancia en la actualidad debido a que estos permiten aumentar la seguridad, facilidad y la rentabilidad de los diferentes sistemas. Cada sistema de control tiene sus elementos característicos.

3.8.1. Control de lazo abierto

Variable por controlar: Se refiere a la variable a la cual se desea que adquiera un valor determinado, también es conocida como variable de salida o señal de salida. En el presente trabajo la variable por controlar es la presión del sistema de bombeo.

Nivel de referencia: Es el dato o valor a la cual la variable controlada debe llegar o permanecer para realizar una acción determinada, este valor puede ser modificado manualmente o a su vez programada previamente por el operador.

Elemento de control: Dispositivo que manipula una variable de forma directa a la variable controlada.

Perturbaciones: Son las diferentes condiciones que se puedan dar y que provocan que la variable por controlar se aleje del nivel de referencia determinado.

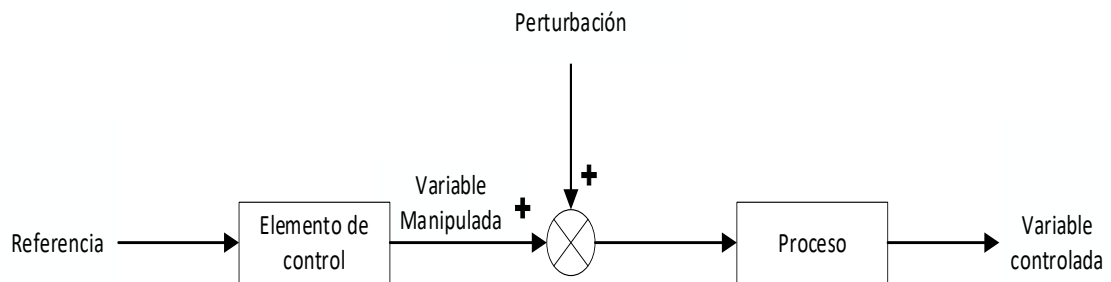


Figura 3. 11. Control de lazo abierto

El control de lazo abierto se da en procesos que no requieren precisión, en este sistema de control no se toma en cuenta el valor que tiene la variable controlada, cuando suceden perturbaciones que alejan el valor del nivel de referencia este sistema no toma ninguna acción para corregirlo. Es decir, la señal de salida no influye en el elemento de control, por lo cual el equipo realiza el trabajo programado sin importa el resultado.

Estos sistemas de bucle abierto son eficientes cuando se ha realizado un estudio a fondo y se ha determinado que no existen variables que alteren o creen perturbaciones que alteren el proceso del sistema realizado.

3.8.2. Control de lazo cerrado

En el sistema de control de lazo cerrado se incorporan un controlador y un lazo de realimentación.

Controlador: Es el elemento que se encarga de comandar al actuador en función del objetivo. En esta etapa se realiza una comparación entre la variable de control y el nivel de referencia previamente determinadas, cuyo objetivo es el reajustar la diferencia presente en estas dos variables hasta alcanzar el equilibrio o estado estable.

Lazo de realimentación: Está formado por un sensor el cual se encarga de medir el valor real de la variable de control, este dispositivo genera una señal proporcional que es enviada al controlador.

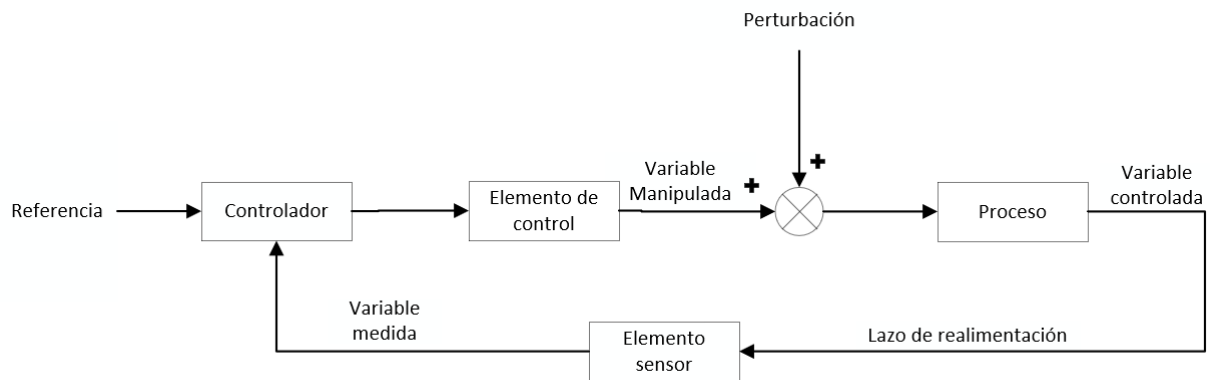


Figura 3. 12. Control lazo cerrado

3.8.3. Elementos de un sistema de control de lazo cerrado

El elemento primario de medición, mide y transforma la energía del medio controlado para dar una respuesta a cualquier cambio en el valor de la variable controlada. Por ejemplo, los sensores que transforman la señal medida en señal eléctrica.

El controlador, es aquel instrumento que compara el valor medido con el valor deseado, en base a esta comparación calcula un error (diferencia entre el valor medido y deseado), para luego actuar a fin de corregir este error. Tiene por objetivo elaborar la señal de control que permita que la variable controlada corresponda a la señal de referencia.

Los controladores pueden ser de tipo manual, neumático, electrónico; los controladores electrónicos más usados son: computadoras con tarjetas de adquisición, PLC (controladores lógicos programables) y microcontroladores (PIC).

El elemento final de control, conocido como actuador modifica el valor de la variable manipulada y ejecuta la acción de control. Los actuadores pueden ser eléctricos (motor, relé, electroválvulas), neumáticos (pistones neumáticos, válvulas) e hidráulicos (pistones hidráulicos).

Los sistemas de lazo cerrado al tener incorporado un controlador y un lazo de realimentación estos sistemas tienen la capacidad de medir y corregir las variaciones en la variable controlada, permitiendo tener un sistema de mayor exactitud en la variable controlada. Se realiza una comparación entre la variable a controlar y la señal de referencia, la diferencia que se da entre estas dos variables es el dato que toma el controlador para modificar la acción del control sobre los actuadores del proceso.

La selección del sistema de control se da en función de las perturbaciones que se puedan presentar en el proceso, si en dicho proceso no existen perturbaciones de ningún tipo se

recomienda utilizar un sistema de control de lazo abierto, puesto que es más sencillo y económico, pero si el proceso tiene perturbaciones o variaciones impredecibles se debe utilizar un sistema de control de lazo cerrado [19].

3.8.4. Modos de Control en lazo cerrado

Entre los modos de control de lazo cerrado tenemos: Control todo o nada, Control proporcional, Control integral, Control derivativo, Control proporcional integral (PI), Control proporcional derivativo (PD) y Control proporcional integral derivativo (PID). A continuación, se describirá detalladamente el Control proporcional y el Control proporcional Integral que son de mayor interés en la presente tesis [4].

Control proporcional

Produce una acción que es proporcional al error. La señal correctora aumentará en la medida en que lo haga el error. Si el error disminuye, también disminuye la magnitud de la corrección y el proceso de corrección se desacelera [4].

Control Proporcional Integral

El modo de control integral por lo común no se utiliza solo, pero con frecuencia se usa junto con el modo proporcional. Actúa sobre la desviación que existe entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional [4].

3.9. Control proporcional integral derivativo

El control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada. En sistemas de bombeo, regularmente nos interesa mantener la presión o flujo constante, por lo tanto, el control PID mide la diferencia entre la presión en la tubería y la presión requerida y actúa variando la velocidad del motor para que podamos tener nuestra presión o flujo constante [20].

El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales: ganancia Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D).

El parámetro Proporcional (P) mide la diferencia entre el valor actual y el set-point (en porcentaje) y aplica el cambio, para aplicaciones sumergibles, el valor recomendado es 50% y para aplicaciones centrífugas, el valor recomendado es de 10%.

El parámetro Integral (I) se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, el ajuste es más rápido, pero puede causar inestabilidad en el sistema, oscilaciones, vibraciones de motor y de la bomba. El valor recomendado para aplicaciones sumergibles es de 0.5 segundos y para aplicaciones centrífugas es de 1segundo. El parámetro Derivativo (D) emite una acción predictiva, es decir, predice el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad del cambio de error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. La corrección sintonización o programación de estos parámetros nos ayuda a controlar de manera efectiva nuestra presión o flujo deseado. Si no se programa adecuadamente estos parámetros, el sistema puede quedar inestable y el motor y la bomba pueden comenzar a vibrar y dañarse [20].

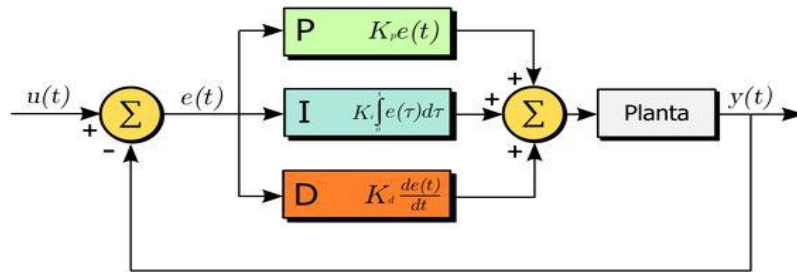


Figura 3. 13. Diagrama de bloques de un control PID

Fuente:[21]

3.10. Módulos didácticos para el control de procesos industriales

Los módulos didácticos se los puede comparar con una planta de procesos industriales, pero a pequeña escala donde su objetivo principal es diseñar, construir y operar un proceso piloto que permita la obtención de información y mejorar el perfil profesional de estudiantes y operarios, así como también contribuir al análisis de la viabilidad del proyecto a implementar, además de conocer los parámetros de operación óptimos del proceso en estudio [10].

Los módulos didácticos tienen que ofrecer mayor flexibilidad que un sistema de un proceso en una planta industrial, debido que dentro de una planta industrial el funcionamiento del sistema va a ser bajo los mismos parámetros de operación y variables de funcionamiento, mientras que en los módulos didácticos los parámetros serán variables con la finalidad de experimentar y generar ensayos con valores distintos y como resultado de estos experimentos o ensayos poder determinar los ensayos óptimos de funcionamiento.

La implementación de módulos didácticos está orientado a la propuesta de enseñanza y al desarrollo de competencias. Donde por competencias se hace referencia a generar habilidades

para el manejo de instrumentos industriales y generar el conocimiento práctico-teórico para la resolución de situaciones profesionales de forma eficiente.

3.10.1. Módulo didáctico para el control de presión

Dentro de los procesos industriales el control de la variable de la presión es muy importante para mantener una producción continua y que pueda operar en condiciones seguras. Se debe considerar que todos los recipientes y tuberías tienen una presión máxima de operación, la cual no debe ser sobrepasada debido a que puede causar serios daños al equipo, así como también a los equipos aledaños, es por ello que es necesario el control y medición de dicha variable para evitar causar daños por sobre presión y que también pueda satisfacer adecuadamente la demanda.

3.11. Controladores lógicos programables (PLC)

Un controlador lógico programable es generalmente utilizado en procesos industriales, fueron introducidos en 1970 [22], para proporcionar las mismas funciones que los sistemas lógicos de relés de manera más compacta, y en la actualidad se da paso de los transistores hacia la fábrica digital [23].

Los PLCs son dispositivos robustos que están diseñados para soportar diferentes condiciones que se dan dentro de las industrias como, frío, calor, polvo, humedad, cuyo lenguaje de programación es de fácil comprensión variando en diferentes elementos según el fabricante, actualmente los PLCs cuentan con varias funciones como manejo de archivos, flujo de programas y lazos PID.

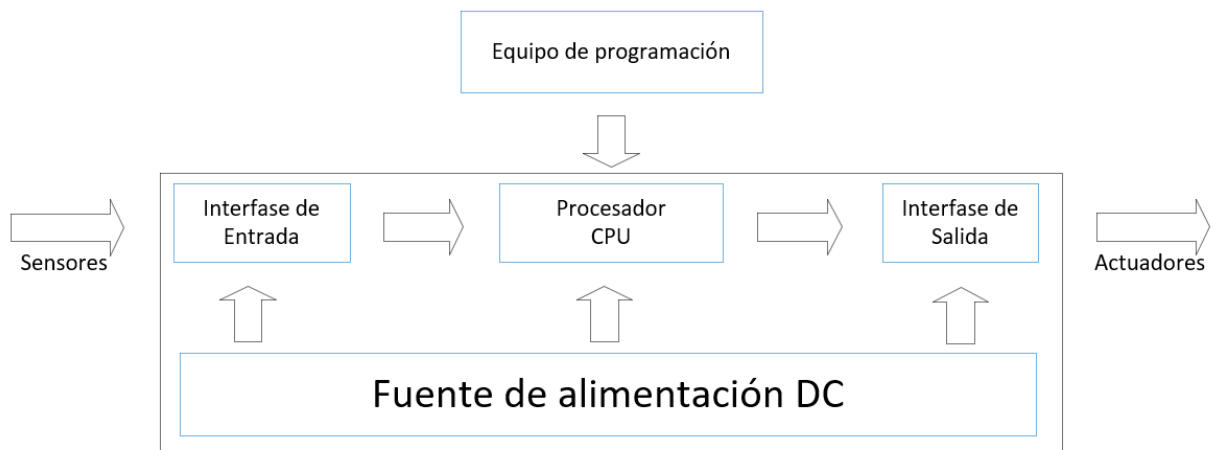


Figura 3. 14. Estructura de un PLC

Fuente: [24]

Un PLC es un dispositivo que permite programar una serie de procesos o secuencias que son activadas por sensores, selectores, entre otras señales de entrada. Para realizar dichas acciones se establece por medio de lenguaje escrito que el controlador lógico programable puede comprender, los lenguajes más comunes son escalera, diagrama de bloques, texto estructurado.

3.11.1. Componentes de un controlador lógico programable

Un controlador lógico programable contiene los siguientes componentes

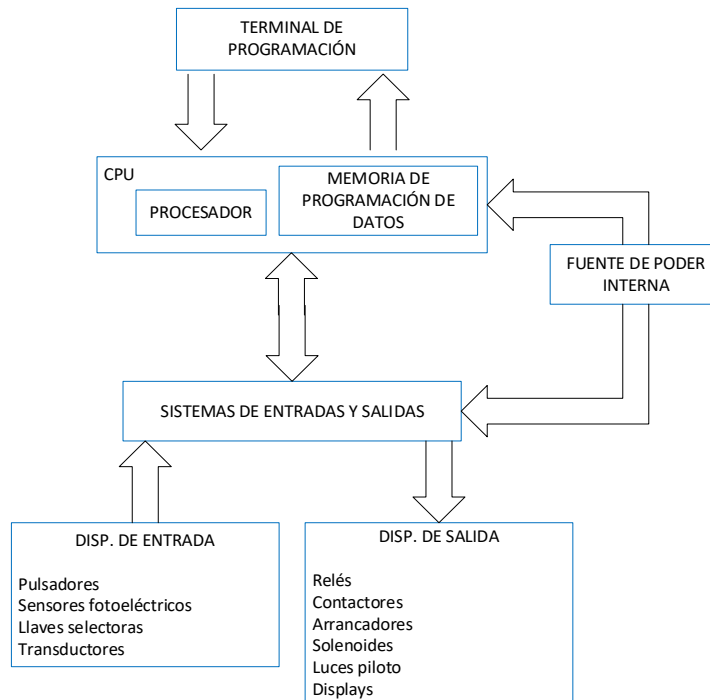


Figura 3. 15. Componentes de un PLC

Fuente:[25]

PLC compacto

Su estructura es compacta, conteniendo todos sus elementos de manera interna al equipo, haciendo que utilice menor espacio dentro de gabinetes [7], las ventajas de estos PLC son:

- Menor espacio
- Programación de fácil entendimiento
- Fácil instalación
- Ahorra mucho cableado.
- Es mucho más sencillo realizar modificaciones en el caso que se requiera.
- Es escalable, se puede añadir más módulos especiales.
- Se puede acoplar una pantalla de mando

PLC modular

Son aquellos que pueden ser configurados y ensamblados de acuerdo a la necesidad, para poder realizar dicha acción se debe estudiar previamente que módulos electrónicos son los necesarios. Cada configuración es diferente, según la tarea de automatización. Cuando se decide instalar PLC modulares, hay que seleccionar cada uno de los componentes, empezando, en primer lugar, por el cerebro del PLC, esto es, la unidad central (CPU), ellos varían de acuerdo con la capacidad de memoria del usuario, tiempo de ejecución y software requerido, en otras palabras, de acuerdo con la complejidad de la tarea o tareas de automatización [4].

En segundo lugar, hay que tener presente el tipo y cantidad de módulos de Entrada/Salida (E/S) digitales y analógicas, módulos inteligentes, etc. De acuerdo con los requerimientos.

En tercer lugar, la fuente de alimentación, según la potencia que consume la CPU, módulos de E/S, periféricos, más módulos futuros.

Y finalmente, el tamaño del rack, conociendo de antemano todos los módulos involucrados y pensando también en expansiones futuras.



Figura 3. 16. PLC modular

Fuente:[4]

3.12. Variador de velocidad

Un variador de frecuencia es un elemento industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor, para regular la frecuencia y la tensión en función a la aplicación, el variador puede reducir el consumo energético del motor entre 20 y 70%.

Los variadores, reducen la potencia de salida de una bomba o un ventilador, mediante el control de la velocidad del motor, las ventajas de utilizar el variador de frecuencia, en sistema de presión constante de agua, son los siguientes [7].

- Un arranque y frenado progresivo del motor, colocando rampas de aceleración y desaceleración.

- Se elimina el golpe de ariete en el sistema hidráulico, ya que se tiene rampas de aceleración y desaceleración que evita que los componentes de la parte hidráulica sufran algún daño.
- La velocidad de la bomba se puede ajustar de acuerdo a lo requerido.
- Alarga la vida útil de los equipos.
- Cuenta con un sistema de monitoreo y protección contra perturbaciones eléctricas, como son sobretensión, sobre corriente, sobrecarga, etc.
- Mejora la productividad.
- Reduce el consumo energético.

3.13. Sensores

Sensor: es un dispositivo que mide una magnitud física y la transforma en una señal eléctrica. La magnitud física puede ser, temperatura, longitud, fuerza o, presión. En efecto un sensor de presión, es un instrumento compuesto por un elemento detector de presión, con el cual se determina la presión real aplicada al sensor utilizando distintos principios de funcionamiento y otros componentes que convierten la magnitud física en una señal eléctrica normalizada [7].

Tabla 3. 1. Clasificación de sensores

Sensores	
Según el tipo de señal eléctrica	Digitales, analógicas.
Según la variable física medida	Mecánicos, eléctricos, magnético, térmicos, ultrasónicos, etc.
Según nivel de integración	Discretos, integrados, inteligentes.
Según rango de valor que proporcionan	On /Off, de medida.

3.13.1. Sensor de presión

El sensor de presión o transductor de presión es un dispositivo que permite la conversión de la presión en una señal eléctrica, en este caso transforman una fuerza por unidad de superficie en un voltaje equivalente a esa presión ejercida [26], estas pueden ser de señal analógica o digital. Los sensores de presión pueden tener tres tipos de señal eléctrica en su salida, estas son: señal en mV, V y 4-20mA.

Los sensores de presión con salida de mV, son dispositivos básicos y económicos, esto debido a que carecen de un circuito de amplificación o acondicionador de señal, debido a esto presentan

un voltaje bajo que requiere ser acondicionado su señal de salida para poder visualizarla, también requiere de fuentes de voltaje reguladas, ya que la variación de la fuente de voltaje provocaría también una variación en la señal de salida del sensor, además de ello la distancia entre el sensor y el dispositivo de lectura debe ser corta [27].

Los sensores de presión con salida de voltaje son dispositivos que tienen un circuito de amplificación y circuito de acondicionamiento de señal integrada, esto permite tener una señal en voltios que va de los 0V a 5V como también se puede encontrar de 0V a 10V. La fuente de alimentación tiene que estar en los límites permisibles del sensor para no causar variaciones en la señal de salida, lo que le da mayor fiabilidad en los datos de medida permitiendo su uso en el entorno industrial [27].

Los sensores de presión con salida de 4 a 20 mA, son dispositivos que brindan una mayor seguridad al transmitir a grandes distancias debido a que no tiene efecto de caída de tensión y el ruido eléctrico tiene bajos efectos en su señal. También es una señal que fácilmente se puede convertirla en señal de voltaje [27].

Los formatos son diferentes, pero destacan en general por su robustez, ya que en procesos industriales están sometidos a todo tipo de líquidos, existiendo así sensores de presión para agua, sensores de presión para aceite, líquido de frenos, etc. [28].

Tabla 3. 2. Clasificación de los dispositivos de control de presión

Dispositivos para control de presión	
Sensores presión	Dispositivos que entregan una señal de pequeño nivel que varía con el valor de la presión presente en su puerto de lectura.
Transmisores de presión	Basados en un elemento sensor de presión, incorporan una electrónica que entrega una señal (analógica o digital) con formato estándar industrial que indica el valor de la presión presente en su puerto de lectura.
Presostatos	También llamados interruptores por presión (presión switches), son dispositivos que activan un contacto al alcanzarse un determinado nivel de presión en su puerto de lectura.
Manómetros digitales	Son la alternativa de precisión a los tradicionales manómetros “de aguja” basados en tubos Bourdon. Se componen de un sensor de presión y de una pantalla que presenta las lecturas. Suelen alimentarse mediante baterías internas.
Barómetros	Son sensores de presión específicamente diseñados para medir la presión atmosférica.

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción del proyecto

El proyecto está basado en generar un sistema controlado de agua a presión constante mediante un sistema PID, por medio de sistemas de control donde se realizara análisis de variación de presión de la tubería y la presión requerida, para controlar la velocidad el motor de una bomba trifásica que suministrara liquido al sistema para su funcionamiento es por esto que se ha optado por un método descriptivo en donde se llevara a cabo la especificación técnica de cada una de las temáticas y elementos a utilizar dentro del control y automatización así como el análisis estructural.

El desarrollo del módulo abarca diferentes antecedentes bibliográficos ya que para la especificación de los elementos se hace uso de textos digitales e impresos que prestan gran relevancia en interpretar una correcta fundamentación científica dentro de un marco teórico, la experimentación inicia con la toma de datos de las variables que se obtiene del sensor de presión mismo que varía dependiendo del consumo, esta variable es interpretada como una señal eléctrica hacia el variador de frecuencia, por medio de un código de programación realizando un control PID que mide la diferencia de presión entre la tubería y la presión requerida, esto permitirá que actúe aumentando o disminuyendo la velocidad del motor.

Este proyecto tiene propósitos a futuro es por eso que el análisis estructural se realizó tomando en cuenta parámetros externos a la investigación que se verá reflejados dentro de la toma de daciones.

4.2. Análisis estructural del módulo de entrenamiento

4.2.1. Tanques

Los tanques serán en forma de un paralelogramo en donde se almacenará el líquido según la formula.

$$V = L1.L2.H \tag{4.1}$$

Donde:

V: volumen (m³)

L1: largo del tanque (m)

L2: ancho del tanque (m)

H: altura del tanque (m)

Los tanques serán realizados con las siguientes características.

Tanque de almacenamiento y tanque de depósito

Los tanques deben caber en la estructura metálica y debe realizarse de un material ligero, transparente para visualizar el llenado y vaciado del líquido, además de soportar golpes que se puedan presentar, por lo tanto, se opta por el siguiente material.

Tabla 4. 1.Características de los tanques

Características	
Forma	Paralelogramo
Material	Policarbonato acrílico

Dimensiones de los tanques

Tanque de almacenamiento

$$V = L1. L1. H$$

$$V = 0,90m. 0,50m. 0.45m$$

$$V = 0.202m^3$$

Abarca $0.202m^3$ de agua equivalente a 202 litros de agua.

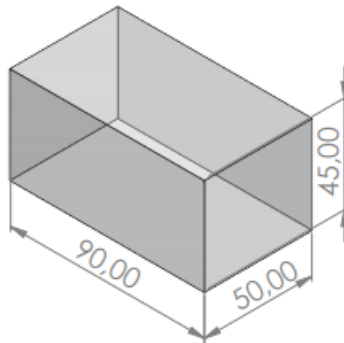


Figura 4. 1. Medidas del tanque de reserva y alimentación de agua para la bomba.

Tanque de depósito

$$V = L1. L1. H$$

$$V = 0,40m. 0,40m. 1m$$

$$V = 0.16m^3$$

Abarca $0.16m^3$ de agua equivalente a 160 litros de agua.

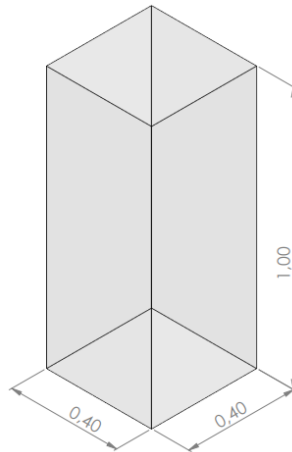


Figura 4. 2. Medidas del tanque depósito

4.2.2. Tuberías

La tubería a utilizar debe cumplir con ciertas características para evitar factores externos que pueden afectar a su funcionamiento normal, así como sus elementos de control y acoples.

- Resistencia a la intemperie
- Resistencia a la presión de agua
- Bajo nivel de oxidación
- Fácil maniobrabilidad

Por lo que se utilizara una tubería roscada de PVC de 1 pulgada, con resistencia de presión de 320 psi.

4.3. Estructura de banco de pruebas

La estructura debe ser capaz de soportar el peso de los elementos y el líquido que por él va a circular, a la vez que será desmontable para un fácil transporte, por lo que para su construcción se empleará de los siguientes materiales.

Tabla 4. 2. Características de la estructura del módulo

Características	
Tubo cuadrado	¾ pulgada, espesor de 1.2 mm
Tol negro	1.5 mm de espesor
Varilla cuadrada	5/8 pulgada
Ruedas rotatorias	Soportan 80 kg

La estructura se realizará en metal que está basado en la norma NTE INEN 2415, calidad SAE J 403 1008, que especifica las dimensiones y composiciones mecánicas, físicas y químicas con las que fue elaborado, según la norma ASTM A36 especifica que se considera a este tipo de

metal como acero suave ya que su contenido de carbono es de máximo de 0.29%, se consideró el uso de este material por su fácil soldabilidad además de sus propiedades mecánicas asegurando así un soporte firme.

Tabla 4. 3. Características del acero ASTM A36

Características del acero ASTM A36	
Resistencia a la tracción	400-500 (MPa)
Limite elástico	250 (MPa)
Módulo de elasticidad	200 (GPa)

4.4. Selección de los componentes eléctricos y electrónicos del banco de pruebas

- Bomba de agua trifásica
- Sensor de presión
- Variador de frecuencia
- PLC SIEMENS S7 1200
- Pantalla HMI SIEMENS

4.4.1. Bomba

La bomba es la encargada de mover el fluido para cumplir con el proceso, en el mercado existen una gran variedad de tipos de bombas y para su selección se debe mencionar las características que debe tener en función de la aplicación que esta va a tener.

Dentro del módulo de bombeo de agua, la parte primordial es la presión que esta va a generar, la tensión que se requiere, y el tamaño del sistema, para lo cual se determina las siguientes características.

- Alimentación trifásica de 220V.
- Potencia de descarga suficiente para la altura del tanque secundario.
- Potencia y flujo que se adapten a los sensores y a la capacidad de los tanques.
- Disponibilidad en el mercado nacional.

De acuerdo a las características mencionadas se procede a determinar la potencia de la bomba que necesita el sistema.

$$P = \frac{Q \times H \times SG}{450} \tag{4. 2}$$

Donde:

P: Potencia en HP, necesaria.

Q: Caudal (litros/ minuto)

H: Altura total del bombeo (m)

SG: Gravedad específica 1.

$$P = \frac{60 \text{ l/min} \times 2\text{m} \times 1}{450} = 0.267 \text{ HP}$$

Según características una bomba periférica funcionara de mejor manera para un sistema de bombeo de agua a presión constante, por el diseño de su impulsor, pero al ser un módulo a pequeña escala la presión no se ve afectada ya que la altura máxima de bombeo es de 2.5 metros.

Tabla 4. 4. Matriz de criterios de tipos de bombas

Matriz de criterios	
Bomba centrífuga de 1HP	Bomba periférica de 1HP
Menor altura de altura de bombeo de 22 m, aproximadamente	Mayor altura de bombeo de 42 m, aproximadamente.
Flujo máximo 156 l/min	Flujo máximo 130 l/min
Menor presión	Mayor presión

Por lo que al contar ya con una bomba centrífuga, se ocupa este modelo para realizar el módulo contando con las siguientes características.

Tabla 4. 5. Características de la bomba

CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA	
Tipo	Centrífuga
Flujo	60 l/min
Voltaje Nominal	Trifásica 220V
Velocidad nominal	3473 RPM
Corriente nominal	3.3 A
Potencia	1 HP

4.4.2. Sensor de presión

La realización del proyecto de mantener el sistema de bombeo a presión constante es necesario desarrollar un sistema de lazo cerrado, para lo cual se utilizará el sensor de presión para la retroalimentación del sistema.

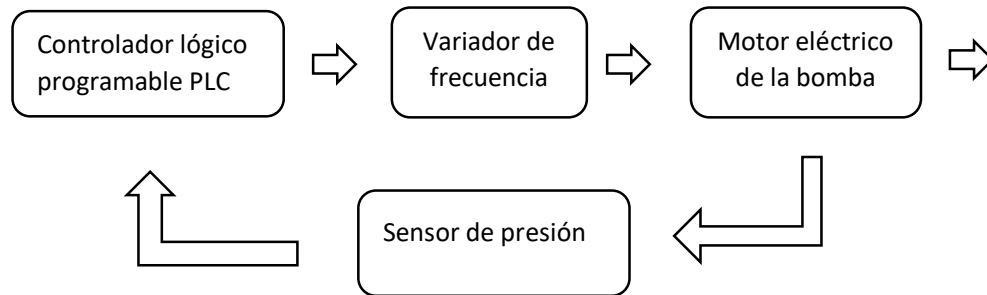


Figura 4. 3. Diagrama de bloques de retroalimentación del sensor de presión en el sistema de control de lazo cerrado

La selección del sensor de presión se debe considerar el rango de medición, donde se recomienda que el dispositivo soporte un porcentaje mayor que la presión máxima del sistema, esto con la finalidad de sobre guardar al sensor en caso de posibles sobrepresiones que se puedan presentar eventualmente en el sistema, así como también se debe considerar el entorno en el que se va a realizar la medición, el ruido eléctrico presente y el tipo de señal de salida, esto debido a que se debe considerar el tipo de señal que el dispositivo de lectura o de control recepte (V o mA).

El sistema de bombeo esta alimentado por una sola bomba de 1 hp, por lo que el sensor de presión debe soportar una presión de 60 psi como máximo, también por motivos didácticos se requiere que su señal de salida sea de corriente (4 a 20 mA), esto permitirá mejorar las destrezas en el manejo de señales de salida de corriente y también de voltaje, ya que se puede fácilmente acondicionar la señal de corriente a voltaje por medio de la integración de una resistencia de 250 Ω .

Una vez mencionadas las características que se requieren, el sensor que cumple con los requerimientos mencionados presenta las siguientes características.

Tabla 4. 6. Características del sensor de presión

Características del sensor de presión	
Tipo	SENDO SENSOR
Serie	SSB15B03
Salidas	Analógicas
Señal de salida	4 – 20 mA y 0,5 – 4,5V
Rango	4 bar – 58.015 psi
Alimentación	12-36 VDC

Conexiones eléctricas del sensor

Este tipo de sensor cuenta con dos tipos de conexiones para entregar una señal de salida.

Para poder obtener una señal de corriente de 4 – 20 mA, se realiza una conexión a dos cables en donde el Pin 1 será la alimentación positiva y el Pin 2 será la señal de salida positiva, como se muestra en la figura 4.4.

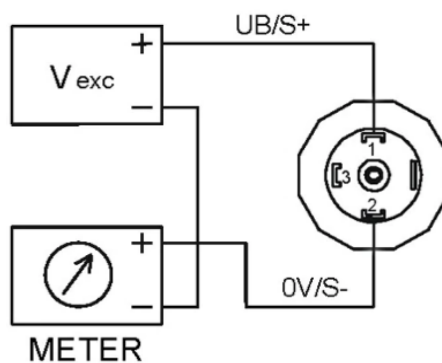


Figura 4. 4. Señal de corriente de 4 – 20mA (2 cables)

Para poder obtener una señal de voltaje de 0.5 a 4.5 V, se realiza una conexión a 3 cables en donde el Pin 1 será la alimentación positiva, el Pin 2 se utilizara como GND y el Pin 3 será la señal de salida positiva como se muestra en la figura 4.5.

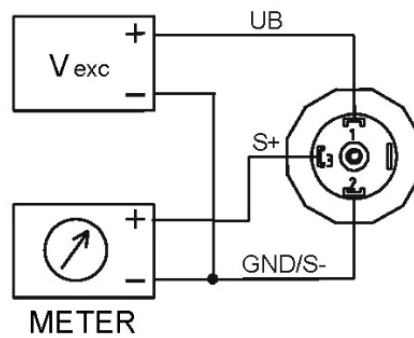


Figura 4. 5. Señal de voltaje de 0.5 -4.5 V (3 cables)

4.4.3. Variador de frecuencia

La función del variador de frecuencia será el modular la velocidad de la bomba de acuerdo a la consigna enviada por el controlador lógico programable y de esta forma mantener la presión constante del sistema de bombeo.

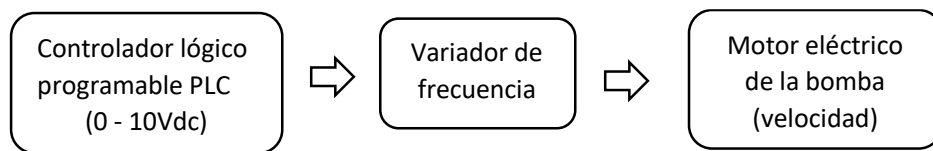


Figura 4. 6. Diagrama de bloques de la función del variador de frecuencia en el sistema de control
La selección del variador de frecuencia está en función de la bomba, del voltaje de alimentación, potencia y corriente, por lo que el variador a utilizar presenta las siguientes características.

Tabla 4. 7. Características del variador de frecuencia

Características del variador de frecuencia	
Modelo	Schneider
Serie	ATV312HU15M3
Voltaje de entrada	Trifásica 200- 240V
Voltaje de salida	Trifásica 200-240V
Frecuencia de entrada	50 – 60 Hz
Frecuencia de salida	0,5 – 500Hz
Corriente de entrada	11.1 A (max)
Corriente de salida	8 A
Potencia	1,5 kW – 2 HP

Diagrama de conexión de variador de frecuencia ATV312HU15M3, como se muestra en la figura su alimentación se lo realiza en una red trifásica, pero el manual indica que si puede ser alimentado en una red bifásica de 220 V, y tendrá una salida trifásica que se alimentará al motor de la bomba.

Para el control del variador de manera remota, se debe tomar en cuenta la siguiente conexión como se muestra en la figura, en donde especifica a donde entrara la señal analógica del sensor de presión, por lo que se utilizara los pines de AI1 y COM.

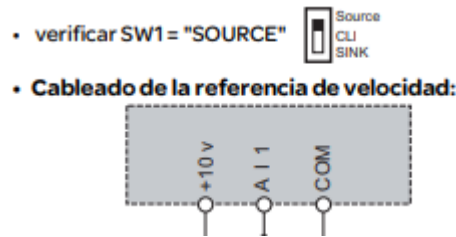


Figura 4. 7. Conexión para valor de referencia de velocidad

Fuente: [29]

Parámetros de configuración

Para la configuración del variador de frecuencia se debe ingresar ciertos parámetros, donde se configurara en base a la placa del motor de la bomba, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. 8. Menú de configuración de los parámetros del variador de frecuencia

Menú	Código	Descripción	Valor
drC (Control del motor)	bFr	Frecuencia estándar del motor (Hz)	60.0
	unS	Tensión nominal del motor (V)	230.0
	FrS	Frecuencia nominal del motor (Hz)	60.0
	nCr	Corriente nominal del motor (A)	3.3
	nSP	Velocidad del motor (rpm)	3600
	CoS	Cos ϕ nominal del motor	0.8

Menú	Código	Descripción	Valor
SEt – (Ajustes)	ACC	Tiempo de aceleración (s)	3.0
	dEC	Tiempo de desaceleración (s)	3.0
	LSP	Frecuencia del motor con referencia mínima (Hz)	0.0
	HSP	Frecuencia del motor con referencia maxima (Hz)	60.0
	,tH	Corriente nominal del motor (A)	3.3
Fun -> SA , -	SA2	Entrada analógica	A,2

4.4.4. Control lógico programable

El controlador lógico programable es el dispositivo que está encargada de la gestión de mantener una presión constante en el sistema de bombeo.

Para lograr determinar las entradas, salidas y señales analógicas que requiere el sistema se realiza una tabla para la asignación de estos parámetros mencionados, con el objetivo de determinar el número correcto de señales que requiere el sistema y determinar las especificaciones que debe cumplir el controlador lógico programable.

La nomenclatura utilizada para comprender es la siguiente

- DI: entradas digitales
- DO: salidas digitales
- I: entradas hacia el controlador lógico programable
- NO: contacto normalmente abierto
- NC: contacto normalmente cerrado
- Q: salidas del controlador lógico programable
- AM2: módulo de entrada analógica
- AI: entrada analógica
- AM2 AQ: módulo de salida analógica
- A02: salida analógica

Se realiza una tabla para enlistar las entradas digitales que van al controlador lógico programable

Tabla 4. 9. Identificación de número de entradas digitales al PLC

DI	Identificador	Función
IO	S1	Paro de emergencia
I1	S2	Encendido

La señal del sensor de presión es analógica por lo cual es necesario que el controlador lógico programable recepte dicha señal.

Tabla 4. 10. Identificación del número de entradas analógicas al PLC

AM2	Identificador	Función	Tipo de señal
AI1	AI1	Entrada analógica sensor de presión	0 – 10 VDC

Luego de que el control identifique y determine una acción, dicha acción es enviada al variador de frecuencia por lo cual es necesario una salida analógica.

Tabla 4. 11. Identificación del número de salidas analógicas del PLC

AM2 AQ	Identificador	Función	Tipo de señal
AO1	AO1	Salida analógica para control del variador de frecuencia	0 – 10 VDC

Para el presente proyecto se selecciona un PLC S7 – 1200 esto debido a que cumple con las características mencionadas.

Tabla 4. 12. Características de entradas y salidas del PLC S7-1200

Identificador	PLC S7- 1200
DI	8
DO	10
AI	2
AO	1
PWM/PTO	2

El PLC es un S7 – 1200 AC/DC/RLY a 120V/220V AC, Con una fuente de 24V a 0.10A y un módulo de comunicación CM1241 rRS422/485.

Para el proyecto resulta de vital importancia el contar con entradas y salidas analógicas para realimentar al sistema con la presión existente en un determinado tiempo para mantener la presión constante. La entrada analógica funciona de la siguiente forma.

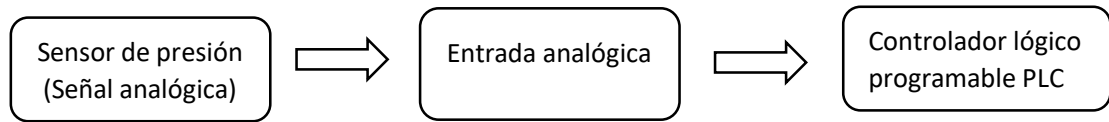


Figura 4. 8. Diagrama de bloques del proceso de la recepción de la señal analógica

La señal analógica del sensor ingresa al controlador lógico programable por su entrada analógica, para conocer el estado del sistema en función del tiempo.

Luego del ingreso de la señal analógica el controlador lógico programable determina la acción que debe realizar el variador de frecuencia para cumplir con el objetivo de mantener la presión constante a través de la regulación de la velocidad del motor eléctrico de la bomba como se representa en el presente diagrama de bloques.

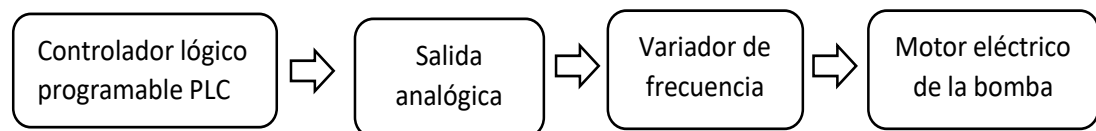


Figura 4. 9. Diagrama de bloques del proceso de control de la velocidad del motor

4.4.5. Interfaz hombre máquina

Para la interacción entre hombre y maquina se utilizara una pantalla HMI.

Tabla 4. 13. Características de pantalla HMI

Características de pantalla HMI	
Modelo	KTP 700 Basic
Dimensiones	7 pulgadas
Alimentación	24VDC
Corriente	0.44 A (máx)

Esto permitirá ver las variables que influyen directamente en el proceso, así como también cambiar el valor de referencia o set point donde se visualizara curvas e indicadores que facilitaran la interpretación del sistema.

4.5. Programación

Para cumplir con el objetivo de mantener la presión constante del sistema de bombeo se indica los requerimientos necesarios que se debe cumplir.

- Mantener la presión constante en todo momento
- La velocidad de la bomba será controlada por un variador de frecuencia en función de la demanda.
- La realimentación del sistema está dada por el sensor de presión
- Variación del set point de presión
- Monitoreo de datos
- Apagar el sistema en caso de sobrepresión

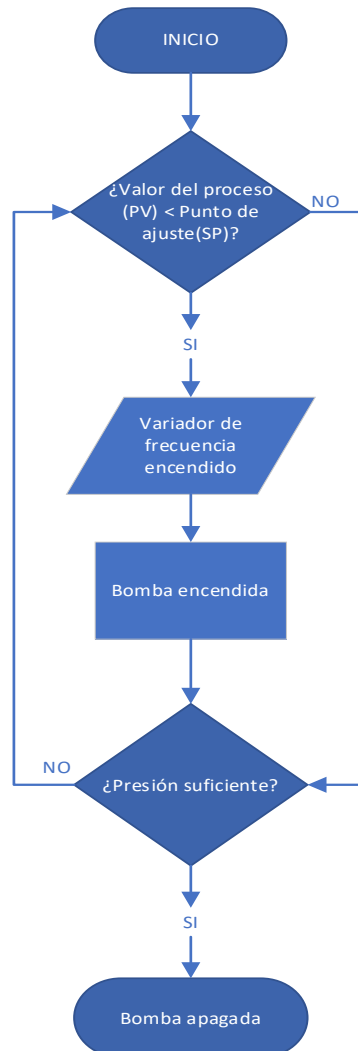


Figura 4. 10. Diagrama de flujo del sistema de bombeo a presión constante

4.6. Programación del PLC

Para la programación del PLC al ser SIEMENS, su programación se lo realizo en TIA Portal que es la plataforma por defecto de Siemens, por lo que la programación consiste primero en convertir la señal del set point que se representa con un valor real y se convierte a valor entero dentro de una memoria, esto se lo realiza para posteriormente poder visualizar dentro de un HMI.

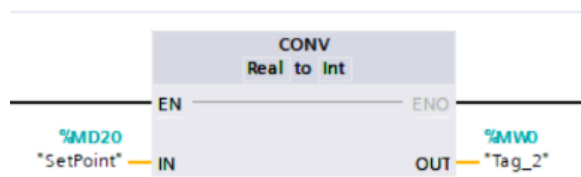


Figura 4. 11. Set Point

Dentro de la programación se realiza un escalamiento de señal analógica de entrada, primero realizando un normalizado de la señal y posteriormente se escala en base al rango que entrega el transductor de presión, en la figura 4.11, se puede identificar el escalamiento de la señal de entrada desde 0 a 40 psi, posterior este dato se lo convierte de real a entero para poder representarlo dentro de una memoria que servirá como visualización.

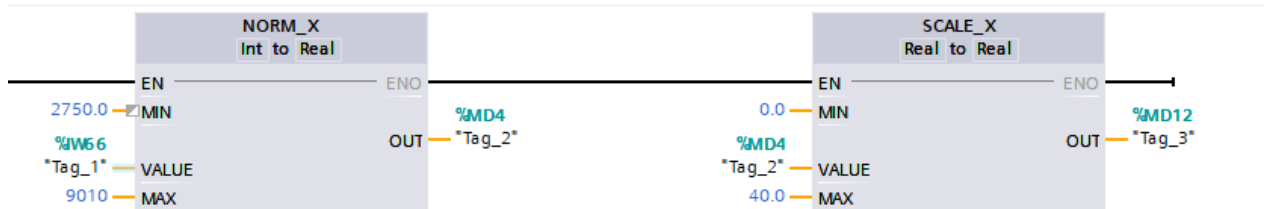


Figura 4. 12. Normalizado y Escalamiento de señal analógica de entrada

Se realiza el normalizado y escalado de la señal del PLC, hacia el variador, indicando que el trabajo de la bomba se represente en un valor de porcentaje de 0 a 100 %, generando una memoria para poder visualizar dentro del HMI como se ve en la figura 4.12.

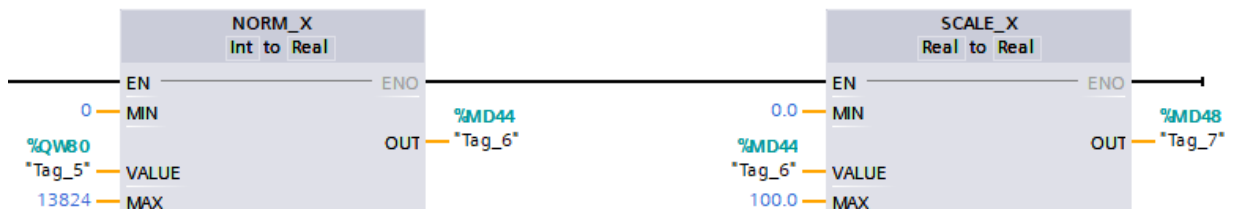


Figura 4. 13. Normalizado y Escalamiento de señal analógica de salida

Dentro de TIA Portal, cuenta con un función de PID_Compact, lo que hace es recibir la señal analogica de entrada que es la variable del proceso y compararla con un valor indicado que es el set point con esto realizando una comparacion entre el valor del sistema y el valor de seteo.

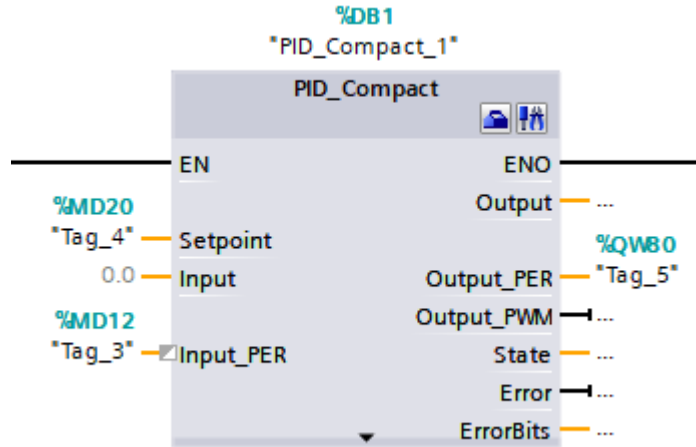


Figura 4. 14. Recepción de valores para control PID

Dentro del PID, se debe ajustar los valores máximos y mínimos que se va a medir del valor real, estos valores van a ser los límites de medición esto como medida de seguridad y para evitar errores de medición.

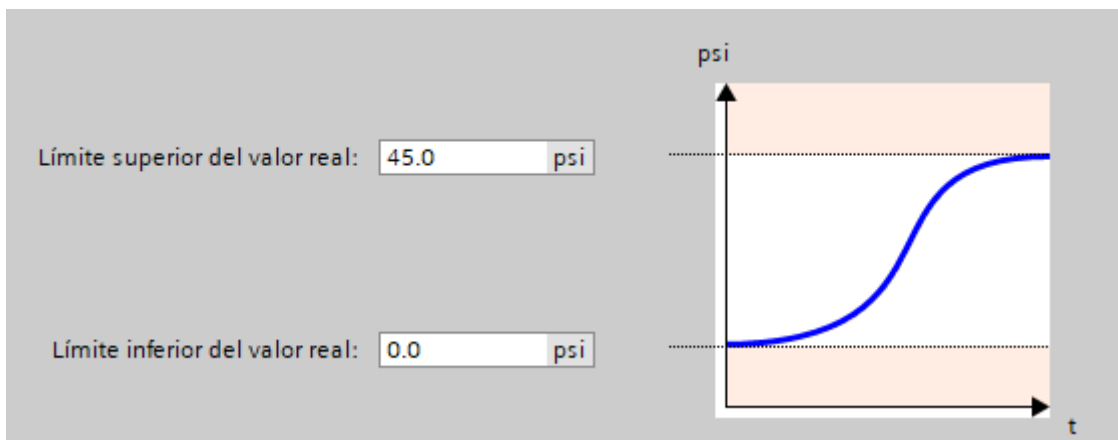


Figura 4. 15. Configuración de valores máximos y mínimos

La escala de valor real son los limites escalados en la programación colocando un valor de máximo escalado de 40 psi, y el valor mínimo es de 0 psi, como se observa en la figura 4.16, que va a ser la entrada analógica enviada por el transductor.

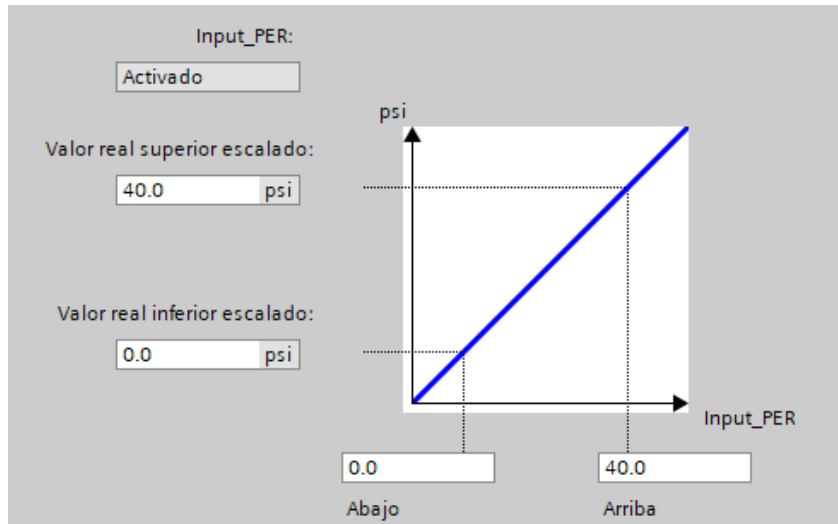


Figura 4. 16. Valores reales escalados

La grafica del valor de salida será el valor el cual se genere en porcentaje con respecto al tiempo, que ha sido designado a la velocidad del motor de la bomba de acuerdo a la necesidad la bomba trabajara dentro de un cierto porcentaje para poder regular el límite de presión que se le ha designado.

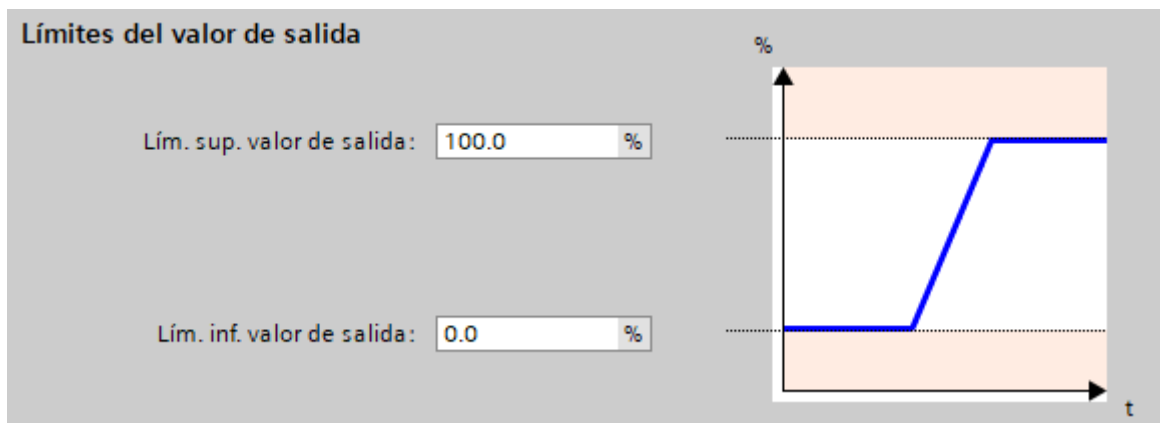


Figura 4. 17. Valor de trabajo de la bomba en porcentaje

4.7. Métodos de sintonización

Sintonía: describe la sintonía como una manera para determinar los parámetros de control de acuerdo con un conjunto de especificaciones para el sistema [30].

4.7.1. Estimación en lazo abierto

La mayoría de procesos ante una entrada escalón presentan una salida creciente y estable y a partir de dicha respuesta se busca estimar los parámetros (δ , τ , t_0) que mejor aproxime las características del sistema [30].



Figura 4. 18. Sintonización de lazo abierto

Fuente:[30]

4.7.2. Estimación en lazo cerrado

La mayoría de procesos al aplicarle una ganancia proporcional su salida puede ser una oscilación mantenida, donde se hallan los parámetros (δc , t_c) [30].

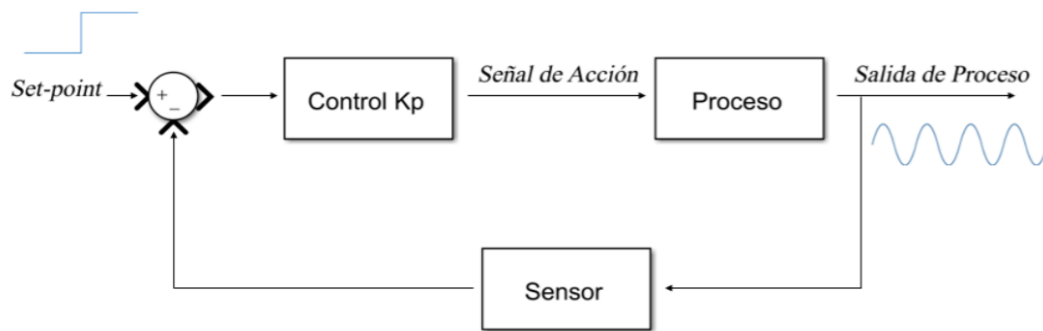


Figura 4. 19. Sintonización de lazo cerrado

Fuente:[30]

4.7.3. Métodos de sintonización de lazo abierto

La sintonización de controladores PID se basa en la determinación y ajuste de sus parámetros (k_p , T_i , T_d), para de este modo lograr un sistema estable y robusto conforme a nuestras especificaciones, haciendo uso de algún criterio establecido.

Antes de realizar la sintonización de estos controladores primeramente se debe identificar la dinámica del proceso y el funcionamiento para ello debemos de identificar claramente sus dos entradas (el valor deseado y la perturbación), la salida (señal realimentada). a partir de esto se puede determinar los valores de ajustes utilizando un método de sintonización que se desee [31].

Método de Sintonía Tanteo

Este método requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso

con bandas anchas en todas las acciones, y estrecharlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

Para provocar cambios de carga en el proceso y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Método de Sintonía Lambda

Es un método sencillo que puede dar buenos resultados en ciertas circunstancias siempre que el parámetro de diseño se escoja adecuadamente. El método básico cancela un polo del proceso, lo que se traducirá en una pobre respuesta de las perturbaciones de carga en procesos dominados por constante de tiempo [30].

- Requerimientos: modelo de primer orden, estable o integral, con tiempo muerto.
- Parámetros de diseño: constante de tiempo del lazo cerrado (λ).
- Factor Lambda
- Controlador PI

Donde T es el tiempo de proceso, se toma luego del tiempo muerto hasta el 63.2% de la curva del sistema en lazo abierto, Kp es la ganancia en porcentaje con respecto a la amplitud del escalón, 0 es el tiempo muerto de la curva y t, siendo λ un factor que al ser multiplicado por t no debe ser menor al tiempo muerto [31].

Tabla 4. 14. Fórmulas para sintonización método Lambda

PID	
Agresivo	Robusto
$K = \frac{1}{Kp} \frac{L/2 + T}{L/2 + T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{L/2 + T}{L/2 + 3T}$
$Ti = T + L/2$	$Ti = T + L/2$
$Td = \frac{TL}{L + 2T}$	$Td = \frac{TL}{L + 2T}$

(4. 3)

Método de Ziegler Nichols

Se refiere a este método como el primer método de identificación propuesto.

Este método consiste en trazar una línea tangente a la respuesta del sistema o curva de reacción en el punto de inflexión o punto de máxima pendiente. Para obtener el modelo, se debe identificar la ganancia del sistema, el tiempo de estabilización y el tiempo muerto [30].

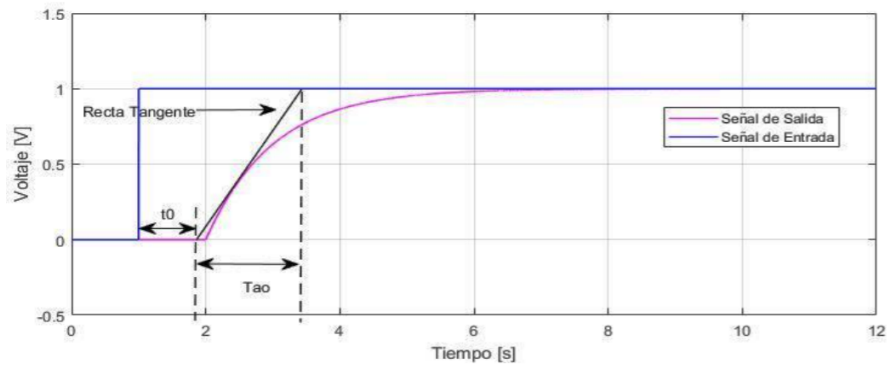


Figura 4. 20. Método de Ziegler Nichols

Fuente:[30]

Método de Miller

Este método se define como una variación del método de Ziegler Nichols, en donde también se debe trazar una línea tangente en el punto de inflexión y el tiempo muerto también se calcula desde el inicio del sistema hasta donde inicia la recta tangente, el cambio se presenta en el tiempo de estabilización, ya que este sería desde donde inicia la recta tangente hasta cuando se llega al 63.2% de la respuesta del sistema [30].

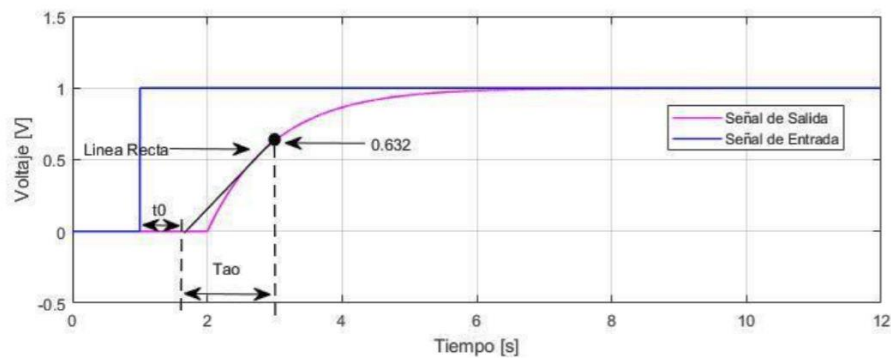


Figura 4. 21. Método de Miller

Fuente:[30]

Calculo del Rendimiento de la bomba

Para determinar el rendimiento de la bomba se realiza la división entre la potencia útil y la potencia teórica.

$$\eta = \frac{NH}{Ne} \quad (4.4)$$

Donde:

NH: es el punto de mayor rendimiento que tiene el sistema y se lo obtiene de multiplicar el caudal (m³) y la variación de Presión (Pa).

$$NH = Q * \Delta P \quad (4.5)$$

Ne: Es el consumo eléctrico que tiene el sistema cuando está funcionando, para lo cual se debe primero determinar si la red de alimentación del sistema es monofásica, bifásica o trifásica, para este sistema se utiliza la siguiente formula de Potencia eléctrica trifásica es:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos\theta \quad (4.6)$$

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Descripción del módulo de entrenamiento

El módulo está destinado a la capacitación de profesionales dentro de procesos industriales, siendo un circuito cerrado de flujo de agua, que será trasladado desde el tanque de reserva por medio de una bomba centrífuga, hacia un tanque de depósito, pasando por un sensor de presión el mismo que recibirá una variable física que la transformará a una señal de corriente para poder ser controlada por medio de un controlador lógico programable, variador de frecuencia, mismos que reciben y procesan las señales que permitirán realizar el proceso de control como si se tratara de un sistema real dentro de la industria.

El control de presión dentro de la tubería será recibido por medio del sensor de presión, que por medio de una entrada analógica enviara la señal de control hacia el PLC, por medio de un código de programación se enviará una señal de salida analógica hacia el variador de frecuencia que alimentará a la bomba variando la velocidad en relación a la presión que necesite el sistema

como se encuentra en la figura de diagrama de tuberías e instrumentos basado en la norma ISA S5.1.

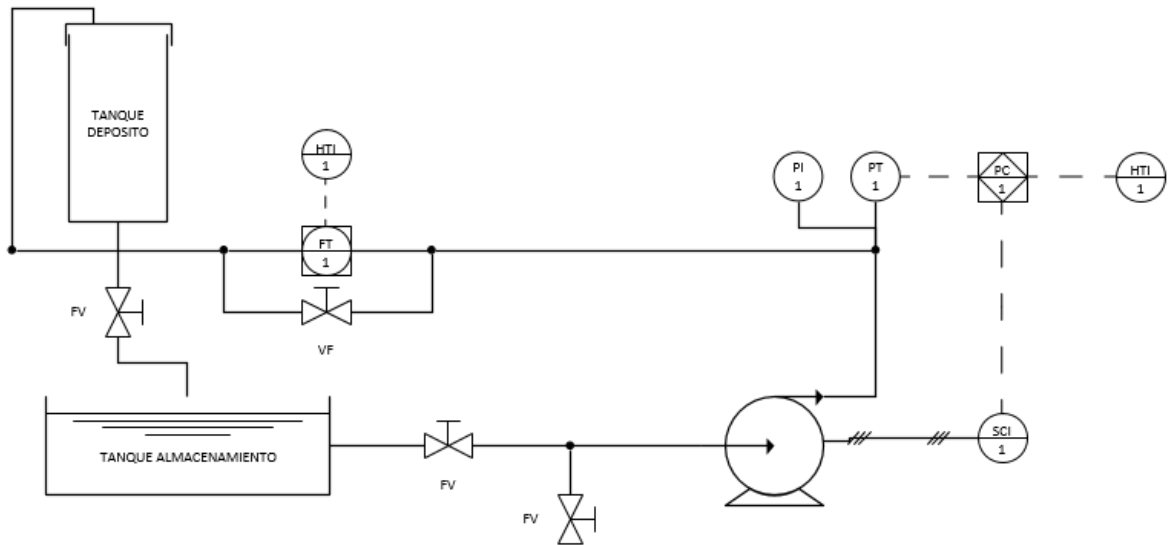


Figura 5. 1. Diagrama P&DI del sistema

5.2. Análisis estructural

El análisis estructural se lo realizó en un software de simulación que permite identificar si una estructura cuenta con las características adecuadas para la construcción, permitiendo observar cómo se comportará la estructura en base al peso a soportar dentro de su funcionamiento, reflejando datos que aseguran un buen funcionamiento y un factor de seguridad al momento de su operación.

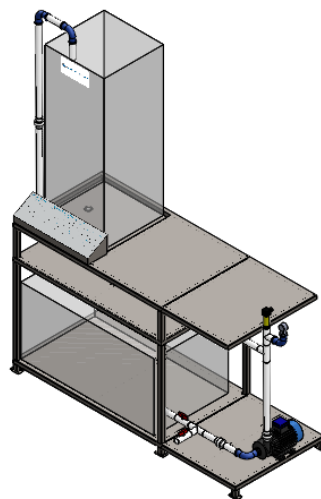


Figura 5. 2. Diseño de la estructura del módulo a implementar

Tensión de Von Mises

El peso colocado a la estructura es de 202 Kg-F que es la capacidad máxima que soportará el módulo tomando en cuenta la cantidad de líquido que estará en constante circulación así como elementos de control de flujo de agua, bomba eléctrica y elementos externos de control, por lo que se puede obtener los siguientes datos donde la tensión de von Mises en la escala de colores es mayormente de color celeste indica que está en la escala de $2.248 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, teniendo en cuenta que $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$.

Tabla 5. 1. Comparación de límite elástico

Límite elástico del material	Límite elástico a soportar
250 MPA	22.48 MPA

Obteniendo así que por las propiedades del material la estructura soportará el peso colocado tanto de los elementos de control hidráulico como de control eléctrico, visualizando que no cuenta con peso excesivo sobre la estructura.

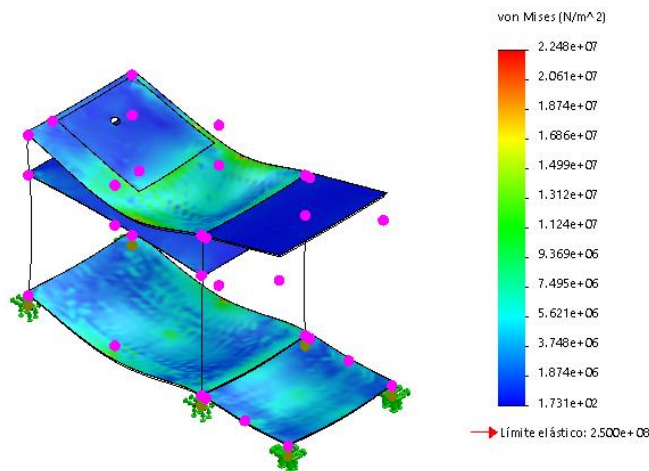


Figura 5. 3. Cálculo de tensión de Von Mises en un software de simulación

Deformación unitaria

La deformación unitaria es la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión, por lo que según la escala de colores indica que el módulo tendrá una deformación unitaria máxima de $1.029 \times 10^0 \text{ mm}$ en la zonas de color rojo, como se puede apreciar el estudio indicando que tendrá una deformación del módulo de 1.029 mm en consideración a su estado inicial, indicando que soportará el peso colocado.

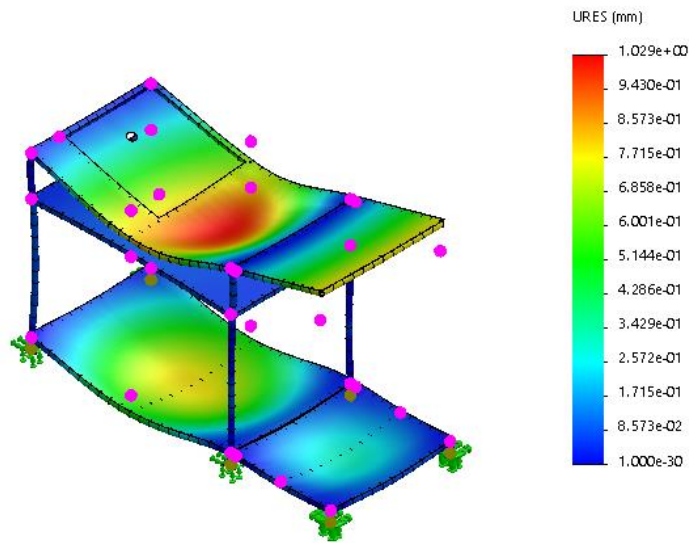


Figura 5. 4. Cálculo de deformación unitaria en un software de simulación

Factor de seguridad

Para que una estructura sea totalmente segura su factor de seguridad debe ser mayor a 1 puesto que el factor de seguridad es la relación entre el esfuerzo normal permisible y el esfuerzo normal de diseño [32].

Esto quiere decir que para que la estructura sea segura los esfuerzos de elasticidad deben ser mayor a los esfuerzos a los que estará sometida la estructura, determinando que la estructura es completamente segura ya que se identificó que su factor de seguridad mínimo es de 1.4.

Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.4

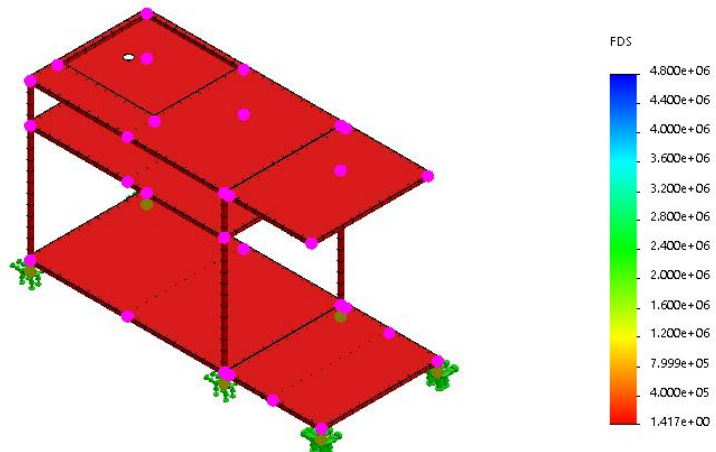


Figura 5. 5. Cálculo del factor de seguridad en un software de simulación

5.3. Puesta en marcha del sistema

La puesta en marcha del sistema se lo realiza para registrar los datos del comportamiento del sistema visualizados en el anexo.

Se realizó la puesta en marcha del sistema tomando datos de ciertas variables, que permitirán detallar las zonas en las que el sistema su funcionamiento es correcto o no, por medio de instrumentos de medición se logra visualizar valores de tensión, frecuencia y presión que permiten observar cómo se comporta el sistema una vez puesto en marcha.

5.4. Comportamiento del sistema

5.4.1. Comportamiento del sistema a válvula abierta

Se realiza la medición de las variables bajo la condición de válvula completamente abierta los datos tomados se los observa en el anexo.

Luego de la tabulación de los datos del sistema a válvula abierta. Se realiza la gráfica del incremento del voltaje del variador y la presión que se genera con dicho incremento. Esto permite determinar el valor mínimo en la que el sensor empieza a medir en función del voltaje del variador.

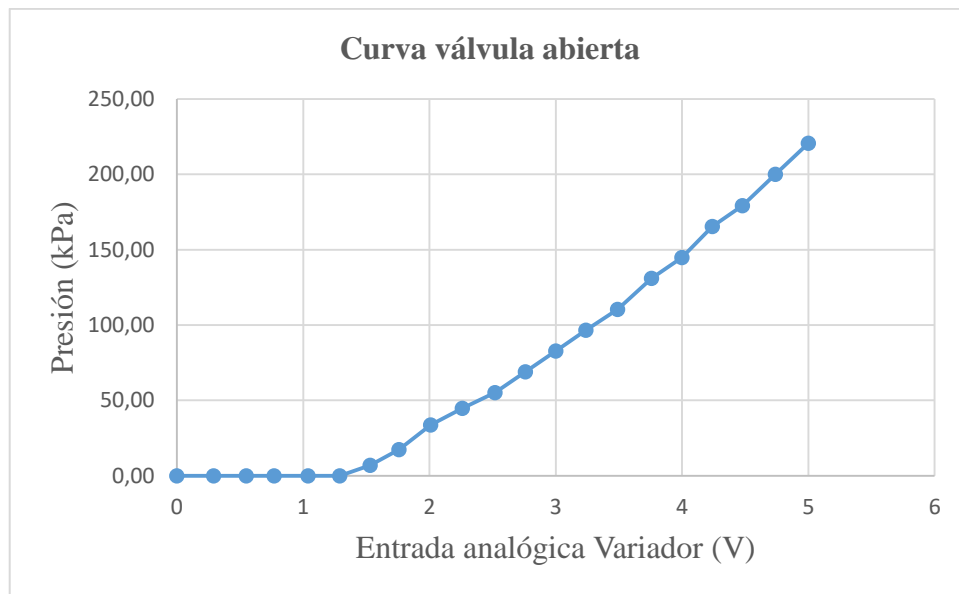


Figura 5. 6. Comportamiento a válvula abierta

Según pruebas realizadas en el módulo se logra determinar que mientras la válvula se encuentre totalmente abierta sin resistencia del flujo dentro de la tubería, mientras que se varía el valor del voltaje del variador, la presión comenzará a aumentar, siendo el valor mínimo de 1. 53 voltios con una presión de 1 psi, logrando observar que la presión máxima alcanzada por el sistema es de 220.63 kPa (32 psi) con un voltaje máximo del variador de 5 voltios, como se observa en la figura 5.6.

Además, se logra ver reflejado que la corriente de la bomba aumenta a medida que se incrementa la presión obteniendo un consumo eléctrico de 3.67 A, con una presión de 220.63 kPa (32 psi).

5.4.2. Comportamiento del sistema a válvula cerrada

Se realiza la medición de las variables bajo la condición de válvula completamente cerrada los datos tomados se observan en el anexo.

Los datos obtenidos en la prueba del comportamiento del sistema a válvula completamente cerrada muestra que se obtiene un incremento de la presión y del consumo eléctrico y se lo representa en la siguiente gráfica.

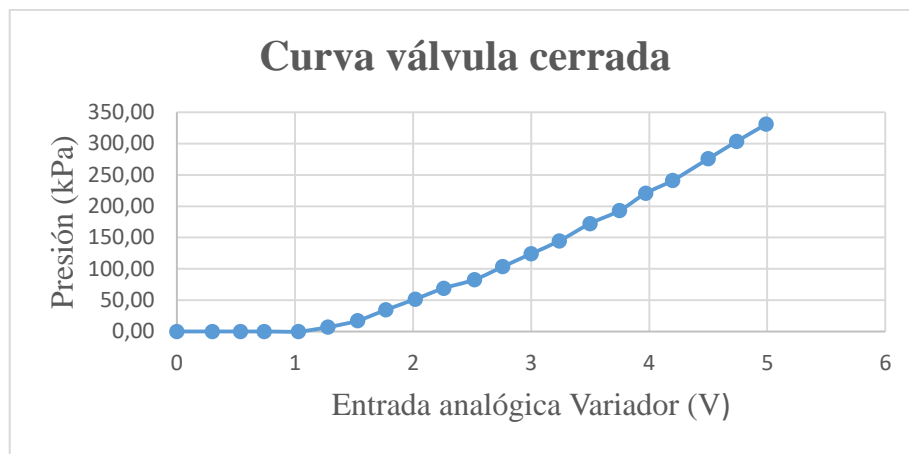


Figura 5. 7. Comportamiento a válvula cerrada

Al realizar las mediciones en el sistema de bombeo con la válvula cerrada, se obtuvo valores cercanos a los medidos con válvula abierta, se logró obtener valores que se interpretan en la curva de trazabilidad en donde se observa que la presión comienza a aumentar a un rango mínimo de 1.14 voltios con una presión de 1 psi, llegando a apreciar que la presión máxima alcanzada es de 330.95 kPa (48 psi) con un voltaje de 5 voltios como se observa en la figura 5.7.

Visualizando que el consumo de corriente es menor con respecto a las pruebas a válvula abierta, como se puede observar en la tabla 5.4, la corriente máxima alcanzada es de 2.42 A, con una presión de 330.95 kPa (48 psi).

5.4.3. Curva de comparación de presión a válvula abierta y cerrada

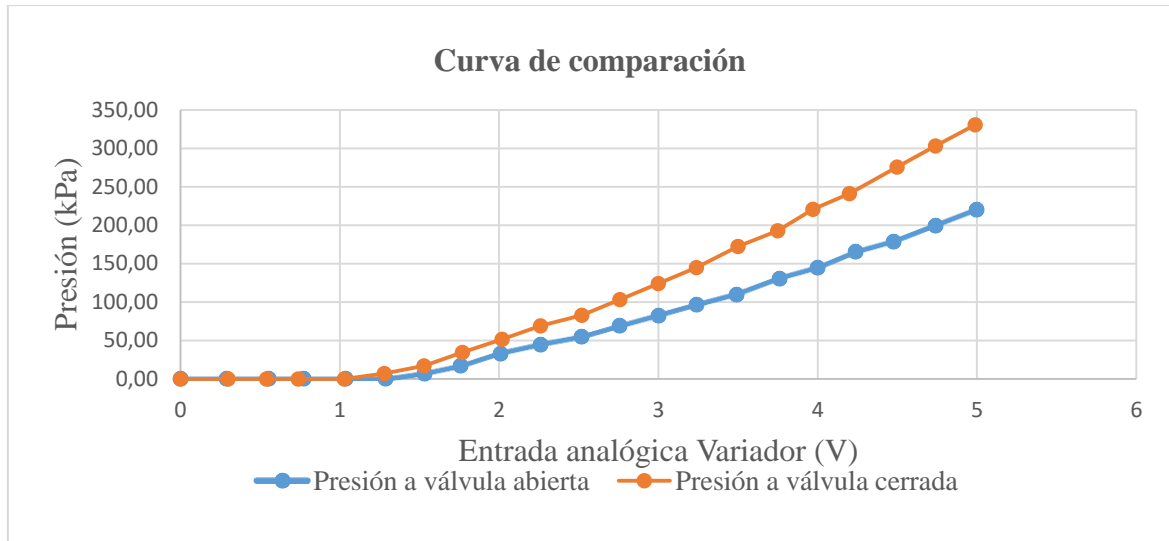


Figura 5. 8. Curva de comparación del sistema a válvula abierta y cerrada

Como se puede observar en la curva de trazabilidad de la figura 5.8, al presentar un mismo valor de voltaje del variador y compararlo con los valores de presión de válvula abierta y cerrada se logra determinar que la presión aumenta mientras se estrangule la válvula de control de flujo, esto se realiza con la finalidad de observar cómo se comporta el sistema, cuando existe una variación en el consumo del flujo de agua, mientras mayor demanda de flujo exista mayor cantidad de corriente consumirá la bomba, sucede lo contrario al disminuir el consumo de flujo, la presión irá en aumento por lo que la corriente disminuirá.

5.4.4. Errores de presión dentro del sistema

Al comparar los datos tomados por medio del sensor de presión y el manómetro se puede apreciar que los datos no tienen similitud de medida en rangos bajos, a la vez que no se puede tomar valores con números decimales por lo que se hace un estimado del valor que se ve reflejado como se ve en el anexo.

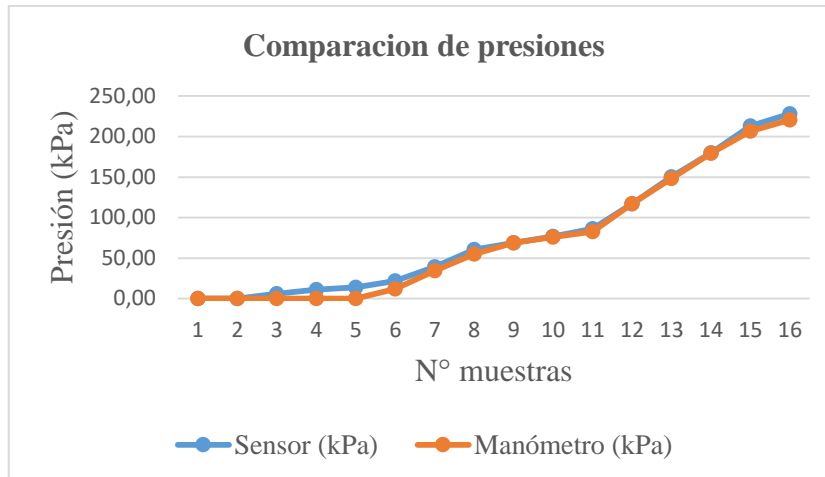


Figura 5. 9. Curva de errores de presión

Como se puede apreciar en la figura los valores del sensor son visibles en la pantalla HMI más pronto que los del manómetro, dentro de ese rango los valores no tienen similitud, la presión llega a un nivel de igualdad en rangos mayores a 34.5 kPa (5 psi), esto se debe a los rangos de medición que cuentan los equipos dependiendo de su rango de exactitud o por errores humanos al momento de realizar la medición debido a la percepción que tiene el operador.

5.5. Sintonización

5.5.1. Línea de tendencia

Para el método de sintonización se debe realizar una curva de tendencia de tipo polinómica en relación a los valores tomados en un periodo de 0.1 segundos realizando así la tabulación de datos que nos permitirá reflejar las pérdidas o ganancias de un conjunto de datos de grandes dimensiones.

Para que la línea de tendencia sea confiable o correcta el valor de R^2 debe ser 1 o cerca de 1.

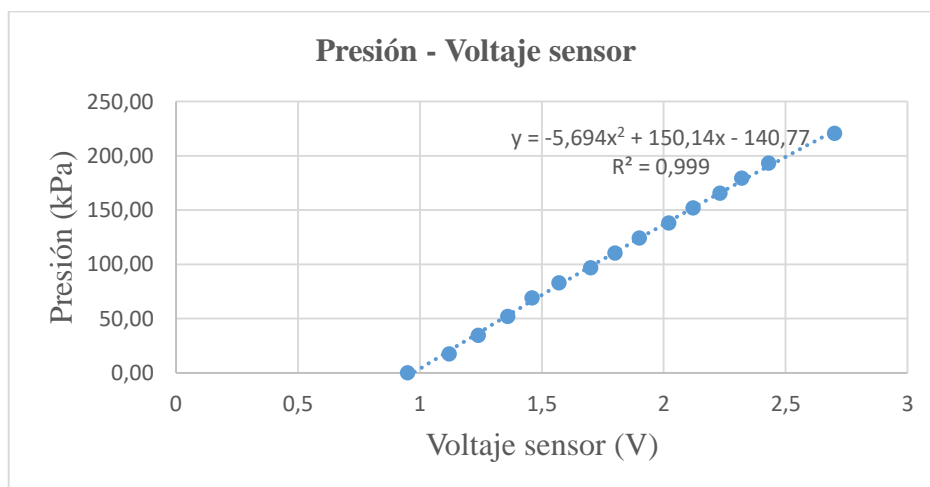


Figura 5. 10. Línea de tendencia, presión y voltaje sensor

Una vez obtenida la línea de tendencia entre los valores de presión del sistema y el voltaje del sensor, se logra obtener una ecuación en donde el valor de R^2 es 1.

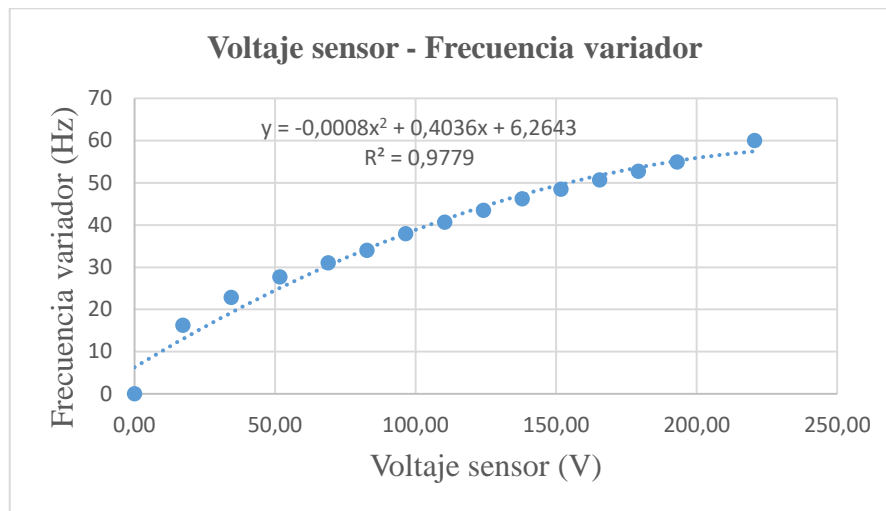


Figura 5. 11. Línea de tendencia, presión y voltaje sensor

Una vez obtenida la línea de tendencia entre los valores de voltaje del variador y la presión del sistema, se logra obtener una ecuación en donde el valor de R^2 es 0.9955.

Estas ecuaciones nos sirven para poder obtener la curva de accionamiento de la bomba por medio de una tarjeta de adquisición de datos que registra datos cada 0.1 segundos permitiendo visualizar como es el comportamiento del valor de seteo y el valor de la variable, así poder calcular por medio del método de sintonización Lambda los valores correctos de sintonización que serán ingresados al controlador lógico programable para el funcionamiento del sistema.

5.5.2. Sintonización método Lambda

Para la sintonización mediante el método Lambda se obtiene la curva de accionamiento de la bomba, para lo cual se da un set point de 206.8 kPa (30 psi), que es la presión máxima estable que brinda la bomba a válvula abierta obteniendo la siguiente curva, cuyos datos se registraron cada 0.1seg.

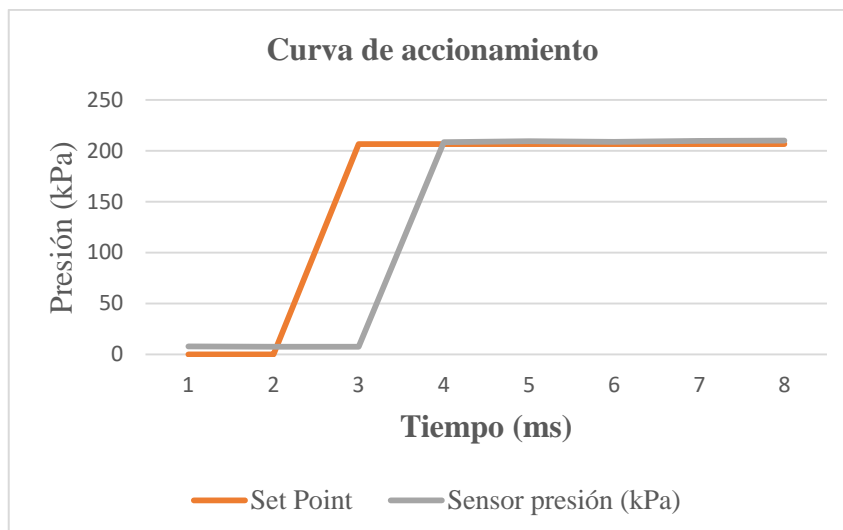


Figura 5. 12. Curva de accionamiento de la bomba

La curva se estabiliza a los 209.5 kPa (30.39 psi), con un tiempo de aproximadamente 1,666 milisegundos. Con estos datos se analiza la curva para obtener los datos correspondientes a la sintonización del PID.

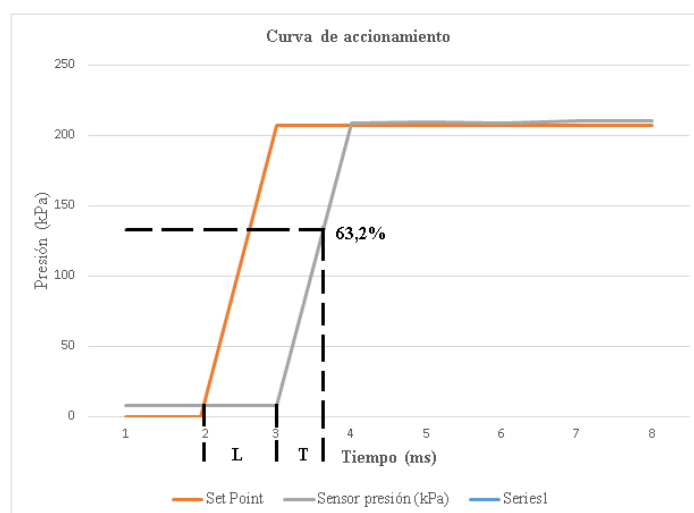


Figura 5. 13. Tiempo de estabilización de la variable

El tiempo muerto es representado por la letra L, donde tiene un valor de 0,1 milisegundo que es el tiempo derivativo, T es Tao, donde el tiempo T es el 63,2% del valor en la que se estabiliza la variable, obteniendo 0,666 milisegundos que representa el tiempo integral, mientras que el K_p se lo obtiene entre la división del valor de la variable estabilizada y el Set-Point. Donde se determina un valor de 1,013.

Tabla 5. 2. Valores de sintonización calculado

PID calculado	
Kp	1.013
T I	0.666
T D	0.1

5.5.3. Comportamiento del sistema con valores de sintonización

Parámetros PID robustos

Haciendo uso de los valores de la tabla 5.2 y utilizando las formulas (4.3) de la tabla 4.14, se realiza los cálculos por medio del método Lambda, se coloca los parámetros de sintonización dentro del PLC, realizando pruebas para ciertos valores de set point obteniendo un control robusto que nos representara un control lento pero preciso con un número menor de oscilaciones que se ve reflejado en la figura 5.14, con los siguientes parámetros de sintonización.

Tabla 5. 3. Valores de sintonización robusto

PID robusto	
Kp	0.34
T I	0.716
T D	0.047

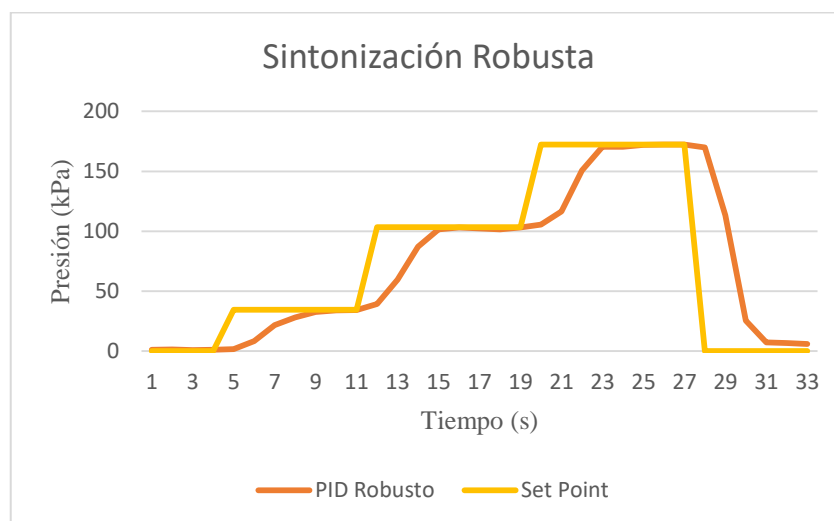


Figura 5. 14. Curvas de sintonización PID robusto

Parámetros PID agresivo

Con las formulas (4.3) se realiza pruebas para un control agresivo, obteniendo así valores que permiten observar un comportamiento diferente al meto robusto, obteniendo un sistema más rápido pero con un incremento leve de oscilaciones, como se muestra en la figura 5.15, realizado con los parámetros de sintonización de la tabla 5.3.

Tabla 5. 4. Valores de sintonización agresivo

PID Agresivo	
Kp	0.987
T I	0.716
T D	0.046

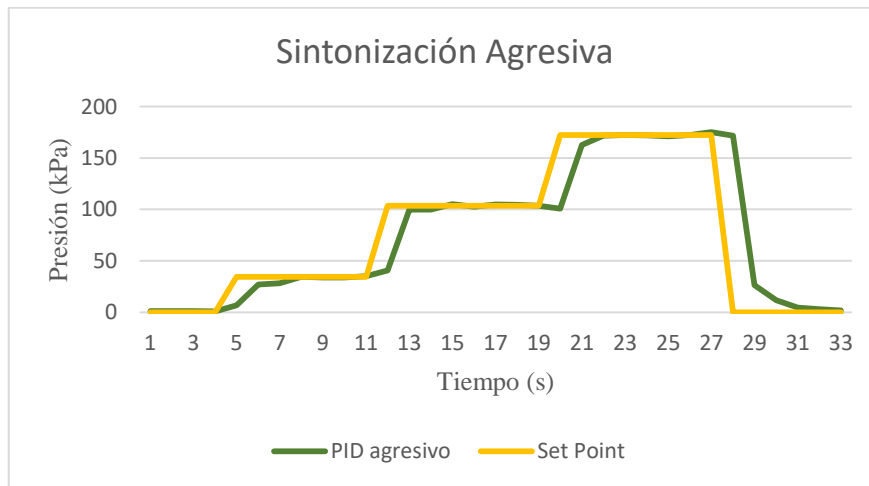


Figura 5. 15. Curvas de sintonización PID Agresivo

5.5.4. Tiempo de respuesta del sistema

Se realiza la comparación del tiempo de respuesta entre el PID Calculado y el PID con Reajuste.

Tabla 5. 5. Tiempos de respuesta

Presión (psi)	PID Calculado (s)	PID con Reajuste (s)
5	6,3	4,57
15	5,48	4,87
25	5,8	5,23

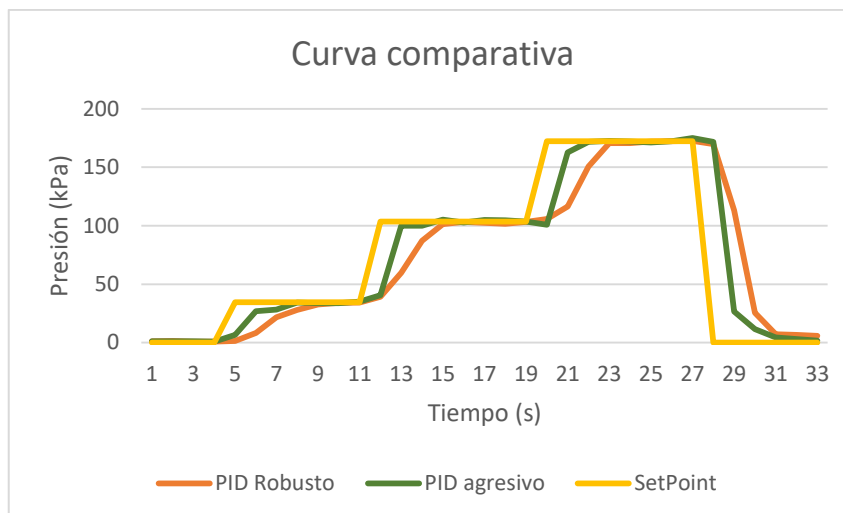


Figura 5. 16. Curva de sintonización PID robusto y PID agresivo

Al realizar una comparación entre los parámetros de sintonización robusto y agresivo, se puede observar que el tiempo en que la variable del proceso llega a estabilizarse con respecto al set point son diferente como se aprecia en la figura 5.17, por lo que se observa que:

Para un control del sistema con método robusto por método Lambda siendo la curva de color naranja, tendrán un tiempo de respuesta más lento, pero con mayor precisión y menos oscilante como se puede observar en la figura 5.16, en donde para un set point de 34.5 kPa, 103.4 kPa y 172.4 kPa (5, 15 y 25 psi), la variable del proceso se demorará un tiempo mayor a 6 segundos, en estabilizarse.

Con un método agresivo al colocar un set point de 34.5 kPa (5 psi), la variable de proceso se demora 4.57 s, demostrando que el sistema es más rápido, pero cuenta con un incremento leve de oscilaciones, indicando que en valores mínimos de presión el sistema tiene un tiempo de reacción lento esto debido a que el sistema entiende que no debe sobrepasar el valor de set point por lo que realiza un arranque suave.

En set point de 103.4 kPa y 172.4 kPa (15 y 25 psi), la variable del proceso llega al valor de set point en un tiempo menor esto debido a que la bomba debe trabajar a mayor capacidad para llegar al punto de seteo como se puede apreciar en la figura 5.17, en donde se visualiza que la curva de la variable de proceso llega a igualarse al set point en un tiempo de 5.23 segundos.

5.6. Rendimiento de la bomba

Curva de rendimiento de la bomba

Tabla 5. 6. Valores de altura y caudal del sistema

H (m)	Caudal (m ³ /h)
34,44	0,198
32,33	2,3112
30,92	3,4668
28,46	4,6044
26,00	5,7456
24,25	6,6672
22,49	7,5528

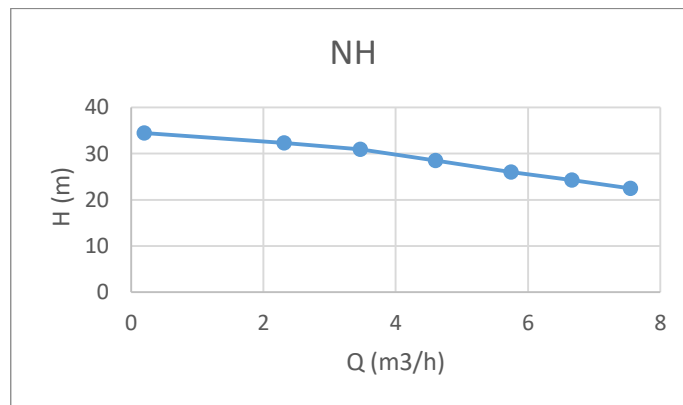


Figura 5. 17. Curva de rendimiento de la bomba

La bomba no cuenta con los datos de fabricante por lo que se procedió a sacar la curva de rendimiento de la bomba para diferentes caudales, obteniendo que la bomba puede suministrar una altura máxima de 34.44 m, para un diámetro de aspiración e impulsión de una pulgada, como indica la fórmula (4.4.).

Consumo eléctrico de la bomba

Tabla 5. 7. Valores de altura y potencia de la bomba

Caudal (m³/h)	Potencia (kW)
0,198	0,97
2,3112	1,15
3,4668	1,29
4,6044	1,38
5,7456	1,47
6,6672	1,51
7,5528	1,56

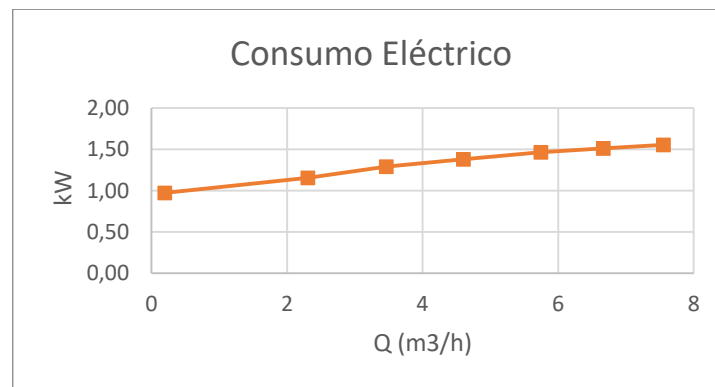


Figura 5. 18. Curva de consumo eléctrico de la bomba

Como se puede observar, en la figura 5.18, el consumo eléctrico de la bomba varía de acuerdo al caudal suministrado, obteniendo la potencia de la bomba es proporcional al caudal mientras mayor sea el caudal mayor será el consumo eléctrico de acuerdo a la formula (4.5) obteniendo así un caudal máximo de 7.55 m³ /h, con una potencia de 1.56 kW.

Se realiza una prueba de operación de la bomba, donde se registra los valores de caudal y altura a diferentes revoluciones del motor de la bomba.

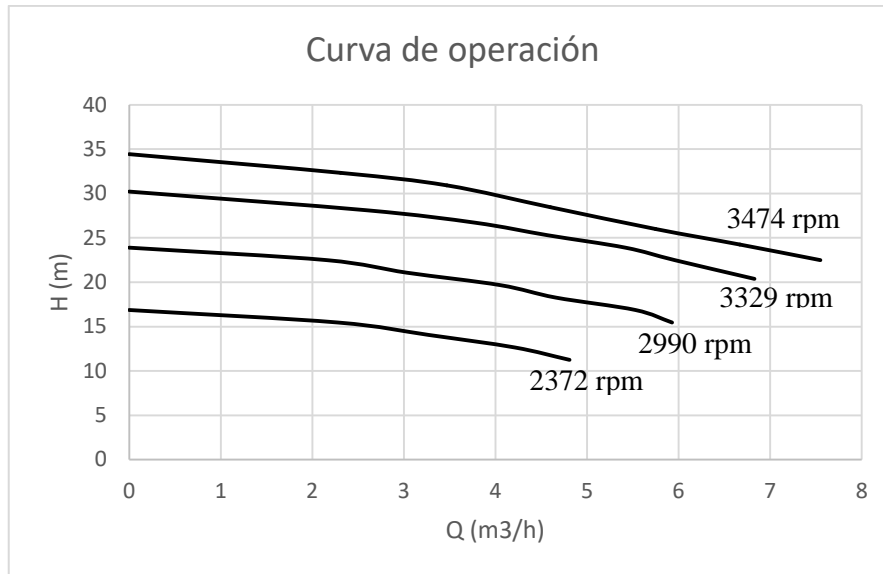


Figura 5. 19. Curva de operación de la bomba

Luego de obtener la curva de operación, se obtiene la curva de rendimiento, para determinar el rendimiento de la bomba en función de las revoluciones que brinda el variador de frecuencia.

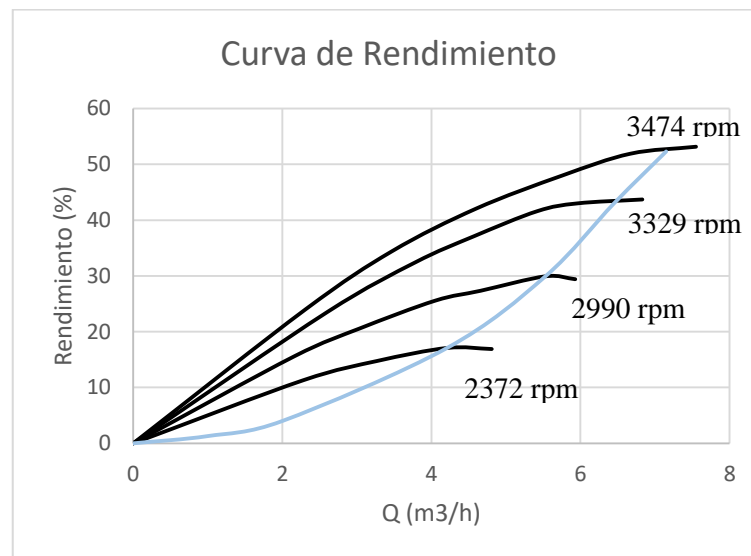


Figura 5. 20. Curva de rendimiento

Esta curva permite determinar el funcionamiento que puede tener el sistema, en función de las revoluciones del variador de frecuencia el caudal que se requiera y su eficiencia con la fórmula (4.3).

La línea azul determina el valor de caudal que entrega el variador de frecuencia en su transición de 0 Hz a 60 Hz en función del rendimiento obtenido. Para la selección de otros caudales se requiere del estrangulamiento de la válvula y de esta forma analizar la opción más eficiente para obtener el caudal requerido.

6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS

6.1. Presupuesto

El presupuesto del proyecto está dividido en dos partes:

6.1.1. Gasto directo totales

Tabla 6. 1. Gastos directos totales

Actividad	Valor total (\$)
Gastos en equipos	1453.36
Gastos en elementos de metal	123.5
Gastos en elementos de PVC	186.3
Gastos en articulo eléctricos y electrónicos	287.45
Otros	499.69
Total	2550.30

Con esto se determina un costo total de gastos directos de \$ 2550.3 (**dos mil quinientos cincuenta con treinta**) dólares americanos

6.1.2. Gastos indirectos

Dentro de los gastos indirectos se encuentran las horas de trabajo en diseño, construcción, tiempo empleado en realizar pruebas y corrección de errores, todas estas horas se las detalla para poder determinar el costo de la hora de trabajo según el salario mínimo en Ecuador para un operador electromecánico que es de \$ 415.07 dólares americanos, que se realiza un cálculo de acuerdo al código de trabajo que especifica, que se debe trabajar 40 horas semanales.

$$\#horas = 8 \text{ horas} \cdot 20 \text{ dias}$$

$$\#horas = 160 \text{ horas}$$

$$\text{Costo} = \frac{415.07}{160} = 2.59 \text{ la hora}$$

Tabla 6. 2. Gastos indirectos totales

Horas de trabajo	Actividad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
120	Diseño estructural	2.59	310.8
96	Construcción	2.59	248.64
80	Programación	2.59	207.2
80	Pruebas de funcionamiento	2.59	207.2
Total			973.84

Determinando que se tuvo un gasto indirecto de \$ 974.85 (**novecientos setenta y cuatro con ochenta y cinco**) dólares americanos.

6.1.3. Análisis del VAN y TIR

Realizando un analisis para 5 años tiempo aproximado de duracion del módulo sin gastos extras con una tasa de descuento de 10% que va a ser el valor de depreciacion del dinero en un cierto tiempo, indicando asi los calculos realizados, que el valor actual neto (VAN) siempre que sea mayor a cero indica que el proyecto es rentable ya que dentro de 5 años se recuperara la inversion y se tendra mayor beneficio, mientras que la tasa interna de retorno (TIR) especifica la tasa a la cual recuperaremos la invercion inicial que sera a un 75%.

Tabla 6. 3. Calculo de VAN y TIR

FLUJO DE CAJA				
Periodos	Inversión Inicial	Ingresos	Egresos	FNE
0	3524,14			-3524,14
1		4000	2000	2000
2		6000	2500	3500
3		6000	2500	3500
4		6000	2500	3500
5		6000	2500	3500
Tasa		10%		
VAN		\$8.379,98		
TIR		75%		

6.2. Análisis de impactos

El presente proyecto brinda información para la implementación de un sistema de bombeo de presión constante mediante el uso de un variador de frecuencia, controladores lógicos programables, sensores y bombas, además del acondicionamiento de las señales analógicas y sintonización, esto ayudará a que los técnicos y profesionales puedan realizar prácticas sobre este tema.

6.2.1. Impacto práctico:

El presente proyecto brinda información para la implementación de un sistema de bombeo de presión constante mediante el uso de un variador de frecuencia, controladores lógicos programables, sensores y bombas, además del acondicionamiento de las señales analógicas y sintonización, esto ayudará a que los técnicos y profesionales puedan realizar prácticas sobre este tema.

6.2.2. Impacto tecnológico:

El avance tecnológico con el que convive el mundo conlleva a una constante capacitación por parte de los seres humanos para estar a la vanguardia y mejorar los procesos, por lo que la implementación de este módulo de bombeo a presión constante para la empresa CEPROIN permite la automatización de un proceso industrial generando una herramienta para que los profesionales puedan prepararse en el uso de controladores lógicos programables, aplicación de sensores y más elementos hidráulicos, cuya herramienta tiene como objetivo ayudar a mejorar los conocimientos teóricos y prácticos de los profesionales para la automatización de procesos industriales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La simulación del diseño del módulo permite obtener: la lista de los elementos a utilizar, el análisis estructural y su factor de seguridad, arrojando como resultado que la estructura soporta 202 kg-F con un factor de seguridad 1.4.
- Los sistemas de control PID requieren de actuadores de respuesta rápida, por ello es de vital importancia que al programar los variadores de frecuencia se seleccione que su tiempo de aceleración y desaceleración tienda a cero o sea cero, así como también los transductores deben ser de respuesta rápida.

- La salida analógica del PLC está programada a un voltaje de salida de 0 a 5 V, debido a que el variador de frecuencia utilizado en este proyecto trabaja con una señal de voltaje de 0 a 5 voltios.
- Los controladores lógicos programables que no trabajan con señales de corriente requieren de la implementación de una resistencia de 250 ohmios para obtener un voltaje de 1 a 5 voltios.
- Los parámetros para la sintonización por método Lambda se obtiene mediante el análisis de la curva de accionamiento del sistema, estos datos pueden ser recopilados por cualquier tarjeta de adquisición de datos con la que se cuente.
- El sistema permite una presión de 220.6 kPa (32 psi) a válvula abierta, mientras que a válvula cerrada alcanza los 337.8 kPa (49 psi) aproximadamente, pero a partir de los 206.8 kPa (30 psi) se obtiene perturbaciones, por lo cual se debe liberar presión para que se pueda estabilizar el sistema.
- La implementación del módulo de bombeo a presión constante, en el centro de capacitación CEPROIN contribuirá a la comprensión del funcionamiento de estos sistemas, además los profesionales podrán capacitarse en el manejo y programación de variadores de frecuencia, PLC, acondicionamiento de señal, configuración de los valores de consigna, sintonización para el método de control PID, uso de sensores para controlar y visualizar dicho proceso a través de un HMI.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de un sensor de nivel que su cobertura de medición no sobrepase los 35 cm a 1 metro de distancia, esto evitará tener errores de medición producto de las paredes del tanque y un sensor de presión de 125 litros por minuto.
- Antes de realizar la puesta en marcha del módulo, se debe conocer las características de los equipos a utilizar y leer los manuales correspondientes, esto permitirá evitar daños por mala conexión, permitiendo a largar la vida útil de los elementos del módulo.
- Se debe realizar la adquisición de los datos del comportamiento del sensor para ver su tiempo de respuesta, perturbaciones de la señal, esto permitirá lograr sintonizar el sistema correctamente.

- Posterior a la obtención de los datos de los parámetros del PID (agresivo o robusto), se debe realizar un reajuste de la ganancia proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo con la finalidad de encontrar la condición más favorable para el sistema.
- Se debe evitar que los sistemas trabajen en los valores mínimos y máximos para evitar perturbaciones o errores para el presente proyecto se debe trabajar en una presión mayor a 17.2 kPa (2.5 psi) hasta los 179.3 kPa (26 psi).
- Se recomienda realizar un test al inicio y al final del curso para medir el nivel de conocimiento teórico-práctico antes y después del curso.

8. REFERENCIAS

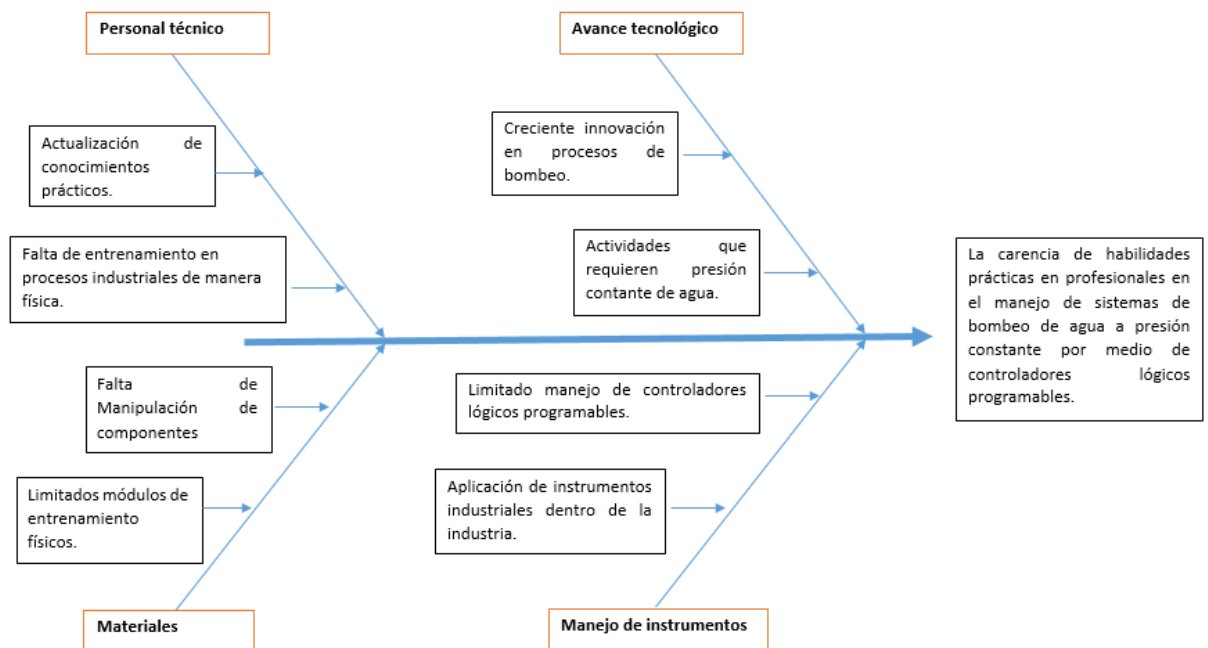
- [1] UNESCO, “Nomenclatura internacional de UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología,” *Unesco*, 1974.
- [2] E. A. Montes Valenzuela, “Análisis hidráulico del sistema de bombeo a través de tanque hidroneumático para el abastecimiento de agua potable en un edificio vertical en la ciudad de Huaraz - Ancash periodo 2017,” *Cienc. Invest.*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [3] D. P. Gualancañay Miñaricaja and H. D. Jaguaco Quiña, “Diseño de un sistema de bombeo para almacenamiento de agua de riego en los sectores de Chan Chico y Tiobamba de la parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017.
- [4] M. I. Céspedes Gonzales, “Diseño y simulación de un módulo demostrativo con fines didácticos de un sistema de bombeo a presión constante de aplicación en edificios e industrias,” Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2018.
- [5] S. B. Tigse Soto, “Diseño y construcción de un módulo didáctico con el PLC s7-1200 para la simulación de variación de presión de un fluido,” Universidad Técnica De Cotopaxi, 2017.
- [6] J. R. Ruíz Pérez, “Diseño e implementación de un prototipo de módulo didáctico de caudal para medir su influencia en el aprendizaje de la instrumentación y control industrial,” p. 192, 2019.
- [7] M. G. Llumiquinga Sanguano, “Control automático para bombeo de agua con variadores de velocidad para obtener presión constante,” Universidad de Ciencias y Humanidades, 2019.

- [8] G. Díaz Rodas and H. Trujillo Aramburú, “Sistema de control de flujo para presión constante de suministro de agua utilizando PLC en un edificio del Instituto de Ciencias y Humanidades,” Universidad de Ciencias y Humanidades, 2018.
- [9] A. M. Vega Morillo, “Diseño e implementación de un sistema de control de variadores de velocidad para obtener presión de agua constante en un edificio de la Universidad Simón Bolívar,” Universidad Simón Bolívar, 2011.
- [10] P. S. Torres Guerrero and F. R. Pérez Castillo, “Diseño y simulación de un módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de ingeniería electrónica de la UNPRG,” Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2018.
- [11] M. Viejo Zubicaray, *Bombas: Teoría, diseño y aplicaciones*, 3a ed. 2005.
- [12] M. A. Monge Redondo, “Cavitación,” 2017. .
- [13] M. A. Varela Muñoz and M. F. S. Monroy González, “Cavitación en los sistemas de bombeo,” p. 59, 2018.
- [14] M. Brown, “Accionamientos estándar Siemens manual de aplicaciones,” 1997.
- [15] A. A. Pezántez Erazo, “Diseño y construcción de un módulo de laboratorio con variador de frecuencia para el control de un sistema.,” Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 2012.
- [16] E. Jiménez Macías, “Técnicas de automatización avanzadas en procesos industriales.” 2004.
- [17] Á. Mejía Neira, D. Jabba, G. Carrillo Caballero, and J. Caicedo Ortiz, “Influencia de la ingeniería de software en los procesos de automatización industrial,” vol. 30, no. 5, 2019.
- [18] R. Fernández del Busto and R. A. Ramírez Mendoza, *Sistemas de control moderno volumen II: sistemas de tiempo discreto*, I. México, 2013.
- [19] A. S. Colman Godoy, “Propuesta de implementación de un sistema de control en lazo cerrado para banco didáctico de hidráulica transparente,” 2020.
- [20] J. L. Torres Capuz and S. X. Chanoluisa Martínez, “Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el laboratorio de automatización industrial.,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [21] F. Pvr, “PID.” .

- [22] H. Vallejo, “Los controladores lógicos programables,” *Todopic.Net*, pp. 3–11, 1970.
- [23] SIEMENS, “SIMATIC a lo largo de la historia.” .
- [24] Master PLC, “Introducción a los controladores lógicos programables.” .
- [25] F. H. Padilla Narvaez, “Sistema de bombeo de agua a presión constante mediante la aplicación de variadores de velocidad,” Escuela Politecnica Nacional, 2000.
- [26] HBK, “Sensor de presión.” .
- [27] Primas Process Metrology, “Transmisor de presión.” .
- [28] SENSING, “Sensores de presión.”
- [29] Schneider, “Schneider Altivar 312,” *Guía Program. ATV312 HU15M3*, vol. 1, pp. 1–127, 2016.
- [30] J. A. Henriquez Novoa and W. J. Martinez Rodriguez, “Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.,” Universidad De La Costa - CUC, 2019.
- [31] J. A. Caicedo Arroyo and G. X. Zambrano Ruiz, “Sistema Scada utilizando protocolos industriales ethernet, modbus y wireless para el monitoreo y control de procesos,” Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, 2018.
- [32] D. J. Cuenca Satan and M. C. Mariscal Bravo, “Diseño e implementación de un banco de pruebas para instrumentos de medición de nivel y flujo para el laboratorio de investigación de automatización y control de la carrera de ingeniería electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2020.

9. ANEXOS

<p>ANEXO I</p>	<p>Diagrama causa efecto</p>	<p>1 de 1</p>
----------------------------------	-------------------------------------	----------------------



ANEXO II	Tabla comportamiento del sistema a válvula abierta	1 de 1
---------------------	---	---------------

Frecuencia (Hz)	Entrada analógica Variador (V)	Voltaje Sensor (V)	Presión manómetro (kPa)	Presión manómetro (psi)	Observaciones	
0	0	0.98	0,000	0	No presenta variación de presión ni flujo	
11.6	1.00	1.50	0,000	0		
13.0	1.10	1.08	6,895	1	Existe circulación de flujo	
16.2	1.35	1.12	17,237	2,5	Medición de presión estable	
22.8	1.90	1.24	34,474	5		
27.7	2.31	1.36	51,711	7,5		
31.0	2.58	1.46	68,948	10		
34.0	2.83	1.57	82,737	12		
37.9	3.16	1.70	96,527	14		
40.7	3.39	1.80	110,316	16		
43.5	3.63	1.90	124,106	18		
46.2	3.85	2.02	137,895	20		
48.5	4.04	2.12	151,685	22		
50.7	4.23	2.23	165,474	24		
52.7	4.39	2.32	179,264	26		
54.9	4.58	2.43	193,053	28		Medición de presión inestable
60.0	5.00	2.70	220,632	32		

ANEXO III	Tabla comportamiento del sistema a válvula abierta	1 de 1
----------------------	---	---------------

Frecuencia (Hz)	Corriente bomba (A)	Voltaje analógico variador (V)	Voltaje sensor (V)	Presión manómetro (psi)
0	0	0	0.99	0
3	0	0.29	0.99	0
6.2	0.48	0.55	0.99	0
9	0.66	0.77	1.02	0
12	0.9	1.04	1.07	0
15.3	1.05	1.29	1.10	0
18.2	1.2	1.53	1.15	1
21	1.32	1.76	1.20	2.5
24.1	1.48	2.01	1.27	4.9
27.1	1.6	2.26	1.35	6.5
30.2	1.71	2.52	1.44	8
33.2	1.83	2.76	1.53	10
36.1	1.93	3	1.62	12
39	2.07	3.24	1.73	14
42	2.25	3.49	1.84	16
45.3	2.49	3.76	1.98	19
48.3	2.59	4	2.11	21
51.1	2.77	4.24	2.23	25
54.1	3.07	4.48	2.38	26
57.3	3.4	4.74	5.54	29
60	3.67	5	5.68	32

ANEXO IV	Tabla comportamiento del sistema a válvula cerrada	1 de 1
---------------------	---	---------------

Frecuencia (Hz)	Corriente bomba (A)	Voltaje analógico variador (V)	Voltaje sensor (V)	Presión manómetro (psi)
0	0	0	0.99	0
3.1	0.08	0.3	1	0
6.2	0.44	0.54	1.01	0
9.2	0.69	0.74	1.04	0
12.1	0.86	1.03	1.08	0
15.1	1.03	1.28	1.14	1
18.1	1.18	1.53	1.22	2.5
21.1	1.36	1.77	1.3	5
24.1	1.39	2.02	1.41	7.5
27	1.49	2.26	1.52	10
30.2	1.63	2.52	1.65	12
33.2	1.64	2.76	1.8	15
36.1	1.67	3	1.95	18
39	1.77	3.24	2.11	21
42.2	1.84	3.5	2.3	25
45.2	1.9	3.75	2.5	28
48	1.99	3.97	2.69	32
51.1	2.06	4.42	2.91	35
54.3	2.19	4.4	3.14	40
57.3	2.26	4.74	3.39	44
60	2.42	5	3.61	48

ANEXO V	Tabla de comparación de presión	1 de 1
--------------------------	--	---------------

Sensor (kPa)	Manómetro (kPa)
0,00	0,00
0,00	0,00
5,88	0,00
11,23	0,00
13,90	0,00
21,93	12,07
39,32	34,47
60,72	55,16
68,75	68,95
76,77	75,84
86,14	82,74
116,90	117,21
150,34	148,24
179,77	179,26
213,21	206,84
227,93	220,63

ANEXO VI	Sintonización Robusta	1 de 1
---------------------	------------------------------	---------------

Sintonización Robusta	
PID Robusto (kPa)	Set Point (kPa)
1,03425	0
1,31005	0
0,89635	0
0,9653	0
1,5169	34,475
8,274	34,475
21,6503	34,475
28,06265	34,475
32,61335	34,475
33,9234	34,475
34,13025	34,475
39,23255	103,425
59,64175	103,425
87,1528	103,425
101,42545	103,425
103,1492	103,425
102,39075	103,425
101,56335	103,425
103,21815	103,425
105,6314	172,375
116,5255	172,375
150,65575	172,375
170,51335	172,375
170,51335	172,375
172,0992	172,375
172,30605	172,375
172,44395	172,375
169,96175	0
113,2159	0
25,44255	0
7,10185	0
6,6192	0
5,86075	0

ANEXO VII	Sintonización Agresiva	1 de 1
----------------------	-------------------------------	---------------

Sintonización Agresiva	
PID agresivo (kPa)	Set Point (kPa)
1,2411	0
1,1032	0
1,17215	0
0,9653	0
6,6192	34,475
26,8905	34,475
28,2695	34,475
34,3371	34,475
33,7855	34,475
33,7855	34,475
35,1645	34,475
40,6805	103,425
99,9775	103,425
99,9775	103,425
105,2177	103,425
102,7355	103,425
104,804	103,425
104,5282	103,425
103,425	103,425
100,87385	172,375
162,722	172,375
171,6855	172,375
172,44395	172,375
172,0992	172,375
171,1339	172,375
172,2371	172,375
175,133	172,375
171,61655	0
26,4768	0
11,65255	0
4,48175	0
3,10275	0
1,7927	0

ANEXO VIII	Gastos directos detallados	1 de 1
-----------------------	-----------------------------------	---------------

Gastos indirectos

Gastos de equipos de control y automatización

EQUIPOS DE CONTROL			
	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Bomba centrífuga	\$ 73.36	1	\$ 73.36
PLC S7 1200	\$ 400.00	1	\$ 400.00
Pantalla HMI	\$ 600.00	1	\$ 600.00
Variador de frecuencia	\$ 180.00	1	\$ 180.00

Los gastos directos desglosados del proyecto de estructura metálica se las detallan en las siguientes tablas.

METAL			
Material	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Tubo cuadrado 1 pulg	\$ 9,00	1	\$ 9,00
Tubo cuadrado 3/4 pulg	\$ 7,00	4	\$ 28,00
Tol 1.5mm	\$ 37,50	1	\$ 37,50
Electrodos	\$ 24,00	1	\$ 24,00
Otros	\$ 25,00	1	\$ 25,00

Los gastos directos desglosados para la instalación del sistema hidráulico.

PVC – 1 pulg			
Material	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Tubo de rosca	\$ 9,50	2	\$ 19,00
Universal	\$ 4,50	6	\$ 27,00
Codo	\$ 1,60	10	\$ 16,00
Unión tipo T	\$ 2,00	10	\$ 20,00
Unión	\$ 1,40	4	\$ 5,60
Acople de tanque	\$ 5,90	4	\$ 23,60

Material	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Llave de paso	\$ 1,50	13	\$ 19,50
Neplo	\$ 1,40	4	\$ 5,60
Otros	\$ 50.00	1	\$ 50.00

Los gastos para la instalación eléctrica y electrónica

Eléctricos y Electrónicos			
Material	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Sensor de flujo	\$ 12,00	1	\$ 12,00
Fuente de 24V	\$ 20,00	1	\$ 20,00
Pantalla Oled	\$ 8,00	1	\$ 8,00
Cables y terminales	\$ 10,00	1	\$ 10,00
Sensor de Presión	\$ 188,00	1	\$ 187,45
Otros	\$ 50,00	1	\$ 50,00

Se tiene una lista de varios donde se enlistan los otros gastos

OTROS			
Material	Cost. Uni.	Cantidad	Precio
Llantas pares	\$ 8,90	2	\$ 17,80
Teflón	\$ 2,00	4	\$ 8,00
Tanques	\$ 380.00	1	\$ 380.00
Hilo PLA	\$ 25,00	1	\$ 25,00

1. Características Técnicas

El variador de frecuencia Schneider presenta las siguientes características técnicas de funcionamiento, estos son los parámetros nominales en los cuales debería trabajar el variador de frecuencia.

Modelo	ATV312HU15M3
Serie	8B 1228 119015
Tensión	200-240 V
Potencia	1.5 kW – 2HP

kW	Input	Output
U (V)	200-240 ϕ 3	200-240 ϕ 3
F (Hz)	50/60	50/60
I (A)	11.1 max	8
HP	Input	Output
U (V)	200-240 ϕ 3	200-240 ϕ 3
F (Hz)	60	0,5/500
I (A)	11.1	8

2. Conexión eléctrica

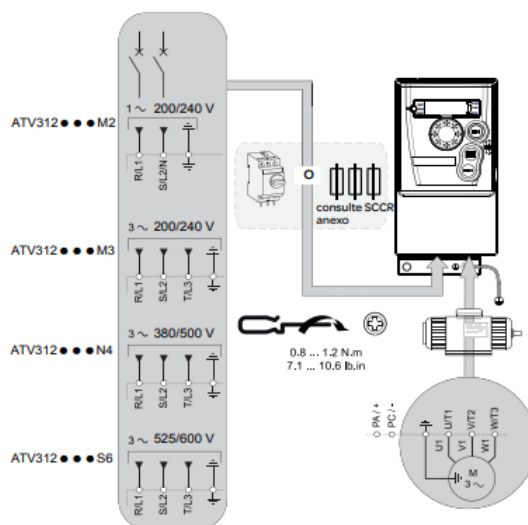


Figura II. 1. Conexión eléctrica variador de frecuencia

3. Recomendaciones:

- Prepare la programación; para ello, rellene las tablas de ajustes del cliente.
- Siempre se puede volver al ajuste de fábrica mediante el parámetro [Restaurar config.] (FCS)
- Para obtener rápidamente la descripción de una función, utilice el índice de funciones.

4. Funciones del visualizador y las teclas (IHM)

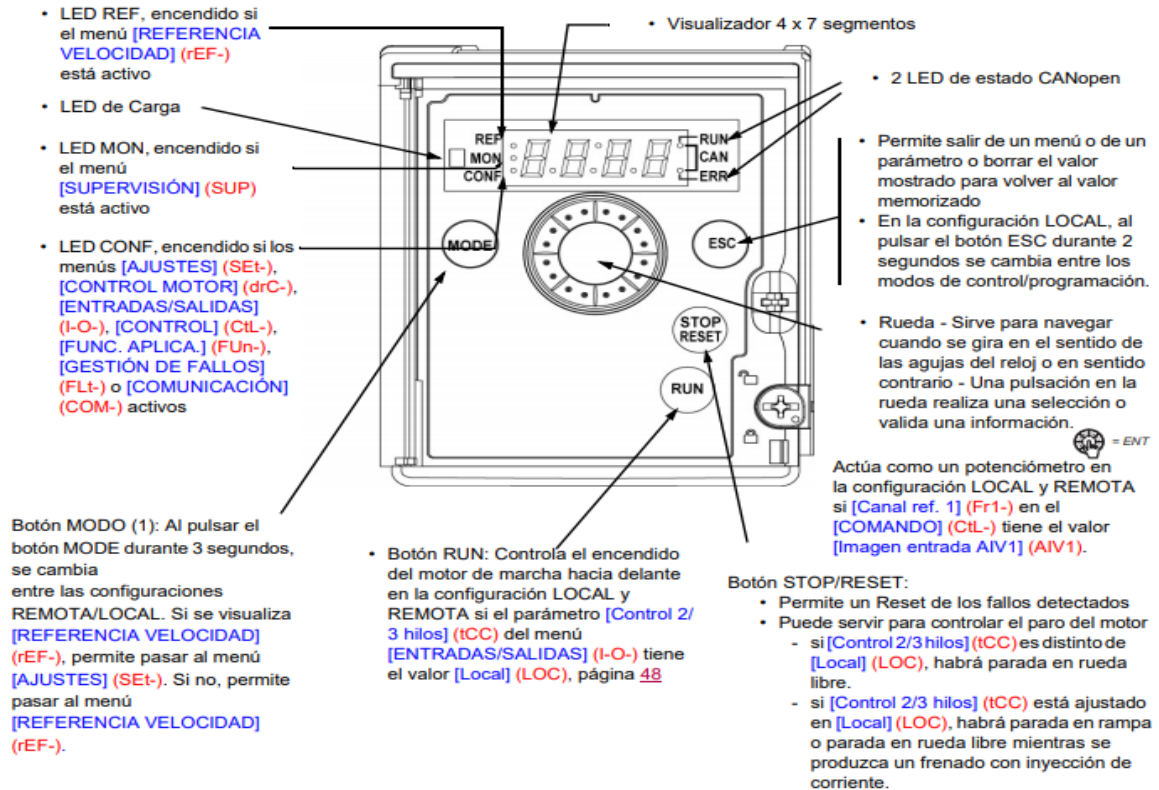


Figura II. 2. Pantalla HMI variador de frecuencia

5. Cableado de control y selección del control

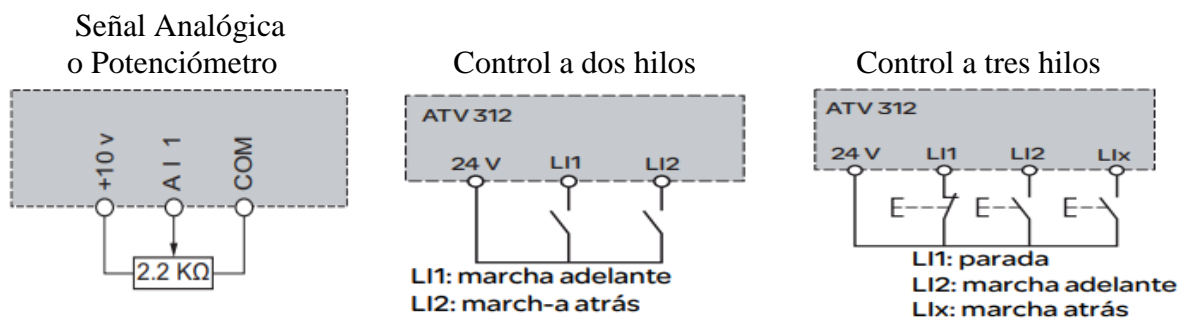


Figura II. 3. Conexiones analógicas y digitales

6. Ajuste de los parámetros de control

Menú	Código	Descripción	5.1 [Configuración Remoto]	5.2 [Configuración Local]	Ajuste de cliente
CEL - [CONTROL]	Fr1	[Canal Ref. 1]: Control de referencia	AL1 (Ajuste de fábrica), AL2, AL3	ALu1	
1-0- [ENTRADAS/SALIDAS]	EC	[Control 2/3 hilos]: Control de comandos	2C : 2 hilos (Ajuste de fábrica) 3C : 3 hilos	LoC	

7. Puesta en servicio rápido

7.1. Ajuste de los parámetros del motor

Consulte la placa de características del motor para ajustar los parámetros siguientes.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
7-3-0	bFr	[Frec. estándar motor]: Frecuencia estándar del motor (Hz)	50.0	
	unS	[Tensión nom. motor]: Tensión nominal del motor en la placa de características del motor (V)	Calibre del variador	
	FrS	[Frec. nom. motor]: Frecuencia nominal del motor en la placa de características del motor (Hz)	50.0	
	nCr	[Int. Nominal Motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	
	nSP	[Vel. Nominal Motor]: Velocidad nominal del motor en la placa de características del motor (rpm)	Calibre del variador	
	CoS	[Motor 1 cos fi]: Cos ϕ nominal del motor en la placa de características del motor	Calibre del variador	

7.2. Ajuste de los parámetros básicos

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
SEt -	ACC	[Aceleración]: Tiempo de aceleración (s)	3.0	
	DEC	[Deceleración]: Tiempo de deceleración (s)	3.0	
	LSP	[Velocidad mínima]: Frecuencia del motor con referencia mínima (Hz)	0.0	
	HSP	[Vel. máxima]: Frecuencia del motor con referencia máxima (Hz)	50.0	
	ITH	[I térmica motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
1-0-	rr5	[Asig. marcha atrás]: Asignación de marcha atrás	L 12	
Fun->PSS-	P52	[2 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L 13	
	P54	[4 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L 14	
Fun->SA1-	SA2	[Ref. sumat. 2] Entrada analógica	A 12	

ANEXO X	Manual Sensor Presión (Sendo sensor)	1 de 1
--------------------------	---	---------------

Este tipo de sensores tienen una temperatura de trabajo de -20 ~ 100 °C, Estos sensores utilizan un transductor de presión piezoresistivo de alto rendimiento, la estructura interna está sellada, con una compensación de temperatura de 0 a 70 °C, adecuado para aplicaciones de precisión en entornos industriales para presiones que van desde 0,1 a 4 bar, líquidos o gas.

1. Datos técnicos

Tensión de alimentación	12 a 36 V cd
Rango de presión	0 – 4 bar
Estabilidad	$\leq 0.2\% \text{ F/año}$
Tiempo de respuesta	$\leq 4 \text{ ms}$
Señal de salida	4 a 20 mA o 0-5V/0.5-4.5V



2. Diagrama de conexión

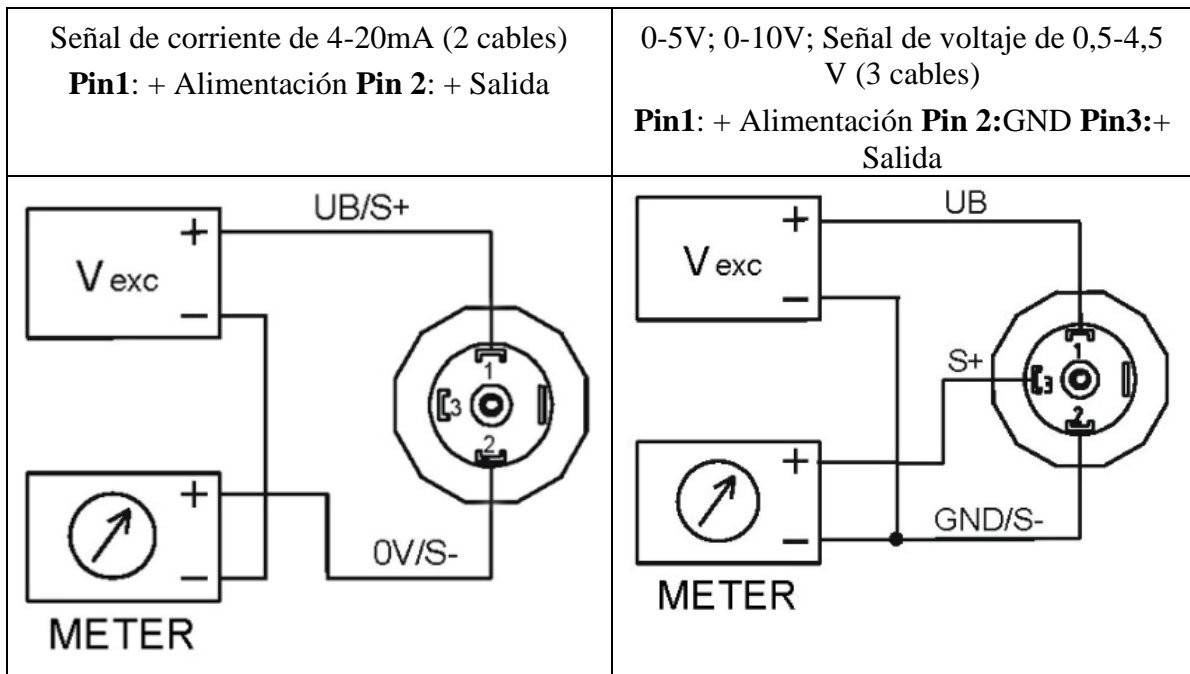


Figura X. 1. Conexiones eléctricas de sensor

1. Creación del proyecto

Se debe abrir el programa TIA Portal V14 como administrador, para evitar errores en las conexiones con otros softwares. Se aparecerá la siguiente pantalla en la cual se debe dar clic en crear proyecto.

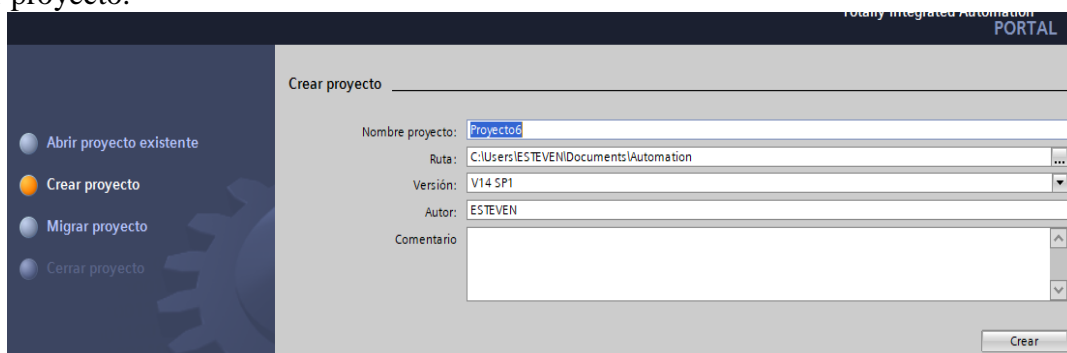


Figura XI. 1. Creación del proyecto

En esta parte se debe llenar datos del proyecto y su ubicación donde se requiere que se guarde programa a desarrollar. Por lo general los documentos se guardan en la carpeta Automation ubicado en Documentos, carpeta que se crea automáticamente al momento de la instalación del software. Luego de llenar todos los datos se debe dar clic en crear.

Posterior a crear el proyecto se debe seleccionar el dispositivo, para ello se debe dar clic en Configurar un dispositivo.

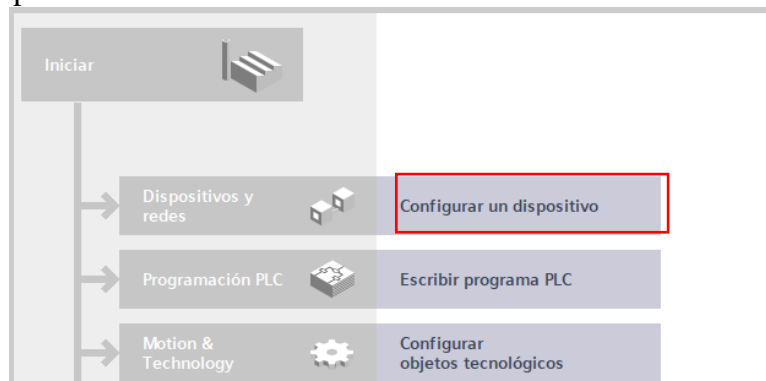


Figura XI. 2. Configuración de dispositivo

Se da clic en la opción Agregar dispositivos, se selecciona la opción controladores y se procede a seleccionar el CPU del controlador, este CPU debe ser el mismo que tenemos físicamente.

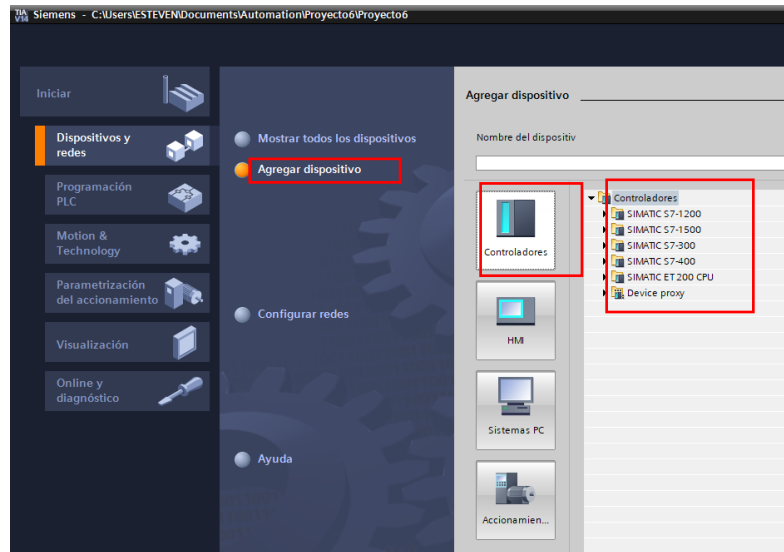


Figura XI. 3. Agregar dispositivo

Para el presente proyecto se tiene un PLC SIMATIC S7-1200, la CPU es 1212C AC/DC/RLY con serie 6ES7 212-1BE40-0XB0.

Todos estos datos se encuentran en el lateral derecho del módulo PLC como se muestra en la siguiente fotografía.

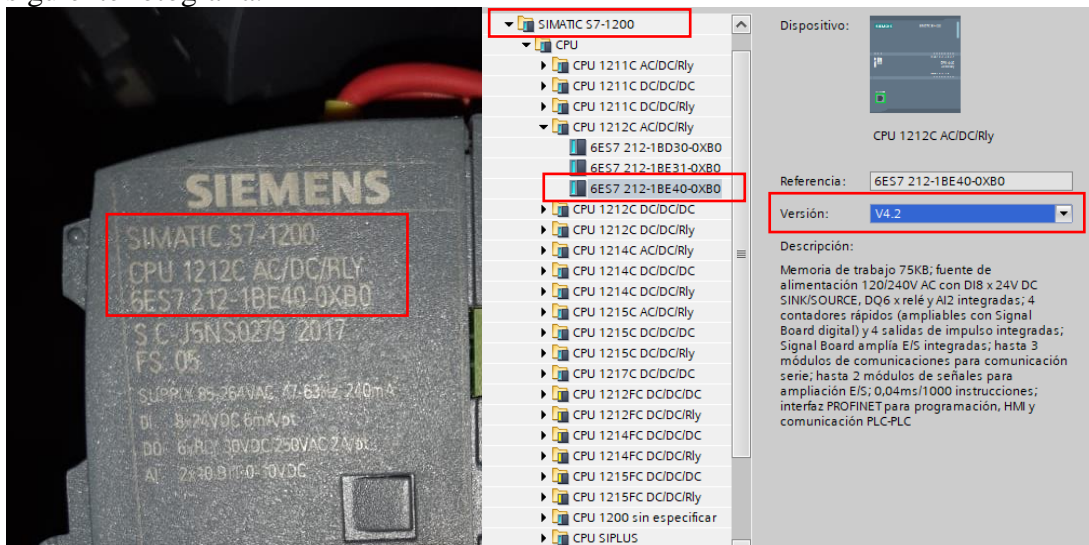


Figura XI. 4. Selección de dispositivo

La CPU debe ser elegida conforme a todos los datos que se detalló anteriormente, posterior a ello se designa la versión más alta y se procede a dar clic en agregar.

1.1. Acondicionamiento de la Señal

Para acondicionar la señal se debe conocer el tipo de controlador y las características que este brinda, en especial sus entradas analógicas que dispone, si dichas entradas son en voltios o en miliamperios, así como los canales que usan.

Para conocer los canales de las entradas analógicas realizamos los siguientes pasos

Clic en Dispositivos y Redes

Clic en el CPU

Clic en Propiedades

Clic en AI 2 dependiendo del controlador elegido mostrara las entradas analógicas que se dispone y los canales que estos usan.

Se resumen el proceso en la siguiente imagen para conocer los canales Analógicos tanto entradas como salidas, así como más características se pueden conocer en esta sección.

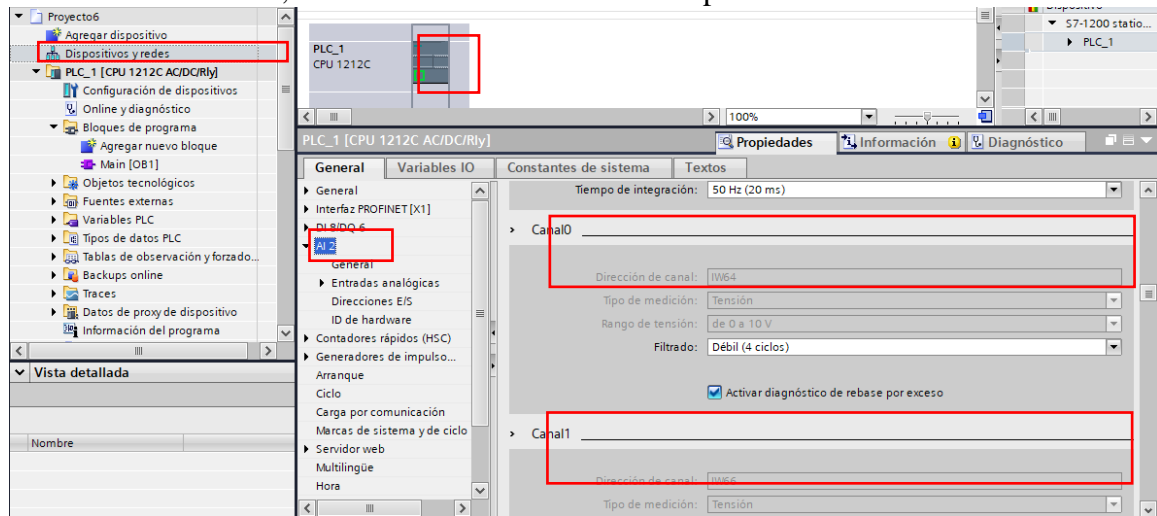


Figura XI. 5. Selección de entradas y salidas analógicas

El acondicionamiento de la señal se lo realiza en bloques de programa, en el bloque Main [OB1], este bloque permite repetir consecutivamente un proceso en el orden programado, respetando que cada uno de ellos se lleve a cabo.

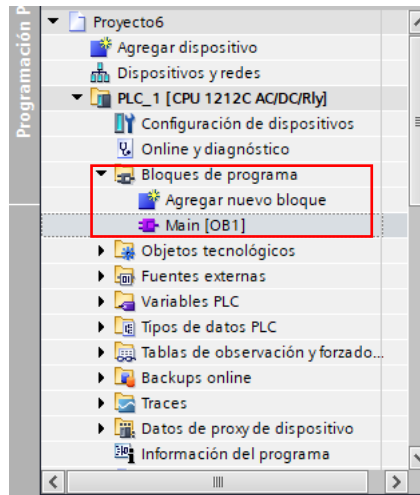


Figura XI. 6. Selección de Main [OB1]

Para acondicionar la señal de entrada se va a realizar un normalizado y un escalado, el normalizado es una Instrucción Básica de conversión que permite ajustar a una norma o un modelo.

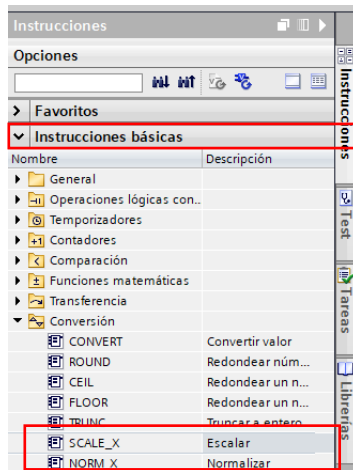


Figura XI. 7. Selección de normalizado y escalado de señal

Para determinar los valores para el normalizado se debe conocer que la entrada es de 10 V, y que es representado por 27648 bits.

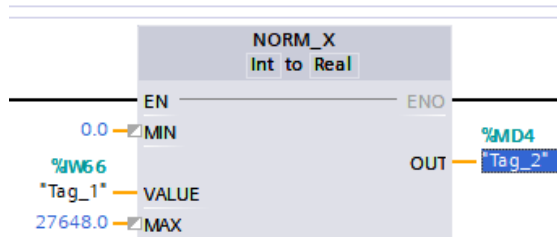


Figura XI. 8. Normalizado del Set point

Los parámetros a configurar son: el tipo de número que se va a emplear, es decir si van a ser enteros o reales, para lo cual se debe elegir como entrada Int que representa a los enteros esto debido a que se va a trabajar con una entrada analógica y la salida debe ser Real. Los valores MIN y MAX son definidos por el valor mínimo y máximo que va a enviar el sensor o en el cual se requiere que trabaje el sistema. Se debe revisar el Sensor y determinar la señal mínima y máxima que va a enviar y transfórmale en los bits correspondientes.

Conversión	
1 V	2764,8
3 V	8294,4
5 V	13824
7 V	19353,6
10V	27648

Value, es donde se debe colocar el canal a la cual se conectó el sensor. Out, es la salida del proceso, este valor de salida debe guardarse en un dato DWORD, estos permiten cadenas de 32 bits, y se debe elegir la marca como MD y el número que se desee, se debe elegir las marcas posteriores con un espacio de 4 números de marca, es decir si elijo la marca MD4, la siguiente marca que se debe elegir es la MD8. Posterior al normalizado de la señal analógica de entrada se procede al escalamiento, esta opción permite que mi señal de entrada se represente en otra escala. Esto permite una mejor apreciación de los parámetros en la programación y en la interacción que posteriormente se realice se lo encuentra en Instrucciones básicas opción de conversión.

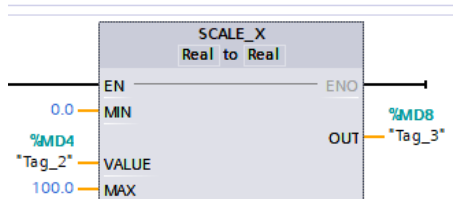


Figura XI. 9. Escalado de la señal de entrada

Para realizar PID's se recomienda que la escala sea de Real a Real, esto debido a que se debe trabajar con señales analógicas en el PID_COMPACT. En los parámetros MIN y MAX se debe colocar el valor mínimo y máximo de la escala que se requiere, por lo general se coloca el valor mínimo y máximo a censar del sistema en cuestión.

Value, se coloca la marca de salida del Normalizado

Out, es la salida del escalado a la cual se le agrega otra marca DWORD.

1.2.PID_Compact

Se recomienda que el PID_Compact del TIA Portal se lo programe dentro del bloque de programa Cyclic Interrupt, este bloque de programa es de clico ininterrumpido, esto permite que el PID esté funcionando independientemente de los demás programas realizados en otros bloques de programación.

Posterior a la creación del nuevo bloque de programación se debe dirigir al fichero Tecnología, ubicado en el lado derecho de la pantalla, seleccionar el Compact_PID, y luego el PID_Compact.

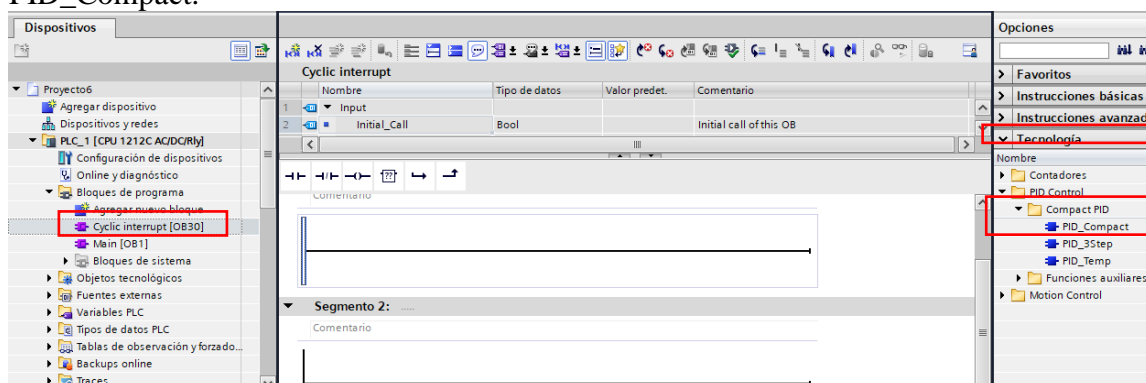


Figura XI. 10. Programación en Cyclic Interrupt

El cambio del nombre del PID_Compact es opcional, los parámetros a configurar son la entrada del punto de seteo (Setpoint), la variable de proceso (Input o Input Per) y la salida de la variable controlada (Output, Output PER u Output PWM).

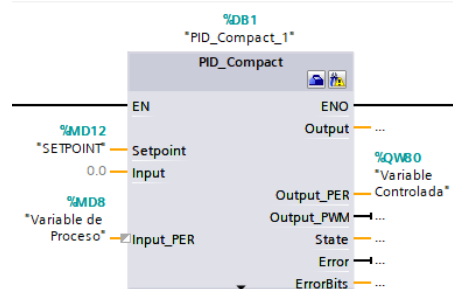


Figura XI. 11. PID_Compact

Setpoint, se utiliza una marca MD, considerando el espacio de los 4 bit's que se debe guardar cuando se usa las marcas MD (MD12).

Input_PER, Canal designado para señales analógicas, donde se debe colocar la marca de salida del escalado que se creó en el Main [OB1] (MD8).

Output_PER_ Canal designado para señales analógicas, donde se debe colocar la marca de salida, para el presente caso se debe designar la marca (QW80).

El PID_Compact tiene dos botones, uno para configurar sus características y el siguiente botón es de puesta en servicio.

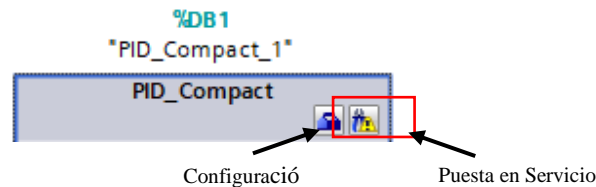


Figura XI. 12. Configuración de PID Compact

Se selecciona el botón de configuración y se debe configurar los siguientes parámetros:

1.2.1. Ajustes Básicos

En la primera parte se selecciona la variable del proceso que se requiere configurar, para el presente caso se elige la presión y su unidad de medida en PSI, se debe recordar que las selecciones de estos datos ayudan a una mejor interpretación por parte del programador y no influye en los cálculos que realiza el software.

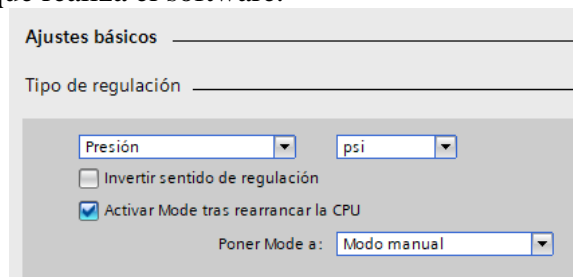


Figura XI. 13. Ajustes de unidades

La segunda parte, se selecciona el tipo de señal de entrada y salida a utilizar, sea Digital (Input, Output) o analógica (Input_PER, Output_PER), para este caso se selecciona la señal analógica (Input_PER, Output_PER).

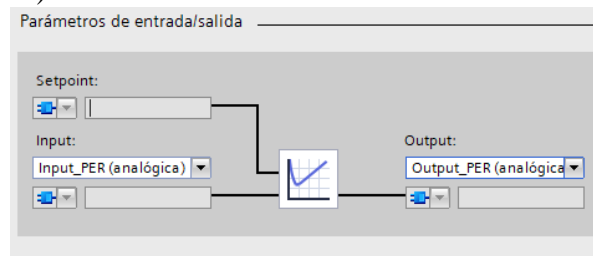


Figura XI. 14. Parámetros de entrada y salida

1.2.2. Ajuste del valor real

Primero se determina los límites del valor real, es decir el valor máximo y mínimo en el que el sistema va a trabajar, para este caso el sensor puede medir hasta 58 PSI, pero la bomba solo alcanza los 49 PSI, por lo cual este valor sera el limite para este sistema.

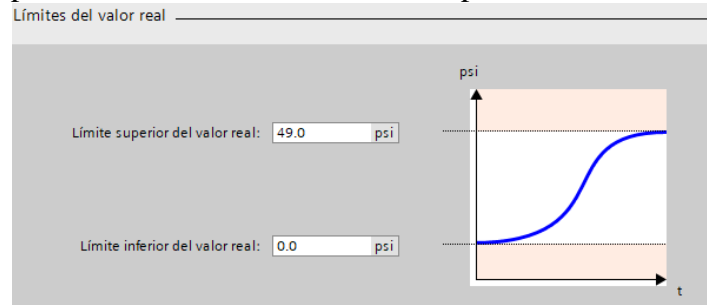


Figura XI. 15. Límite de valor real

Segundo, se determina el valor real de escalado, que se refiere a determinar el valor de escalado superior e inferior, como ya se hizo el acondicionamiento de la señal en el bloque de programa Main [OB1], en esta sección se colocan los límites del sistema nuevamente.

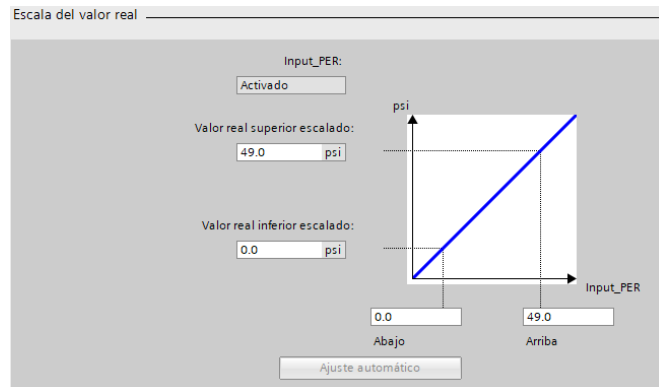


Figura XI. 16. Escala de valor real

1.2.3. Ajustes Avanzados

En esta sección se debe seleccionar Parámetros PID, donde hay dos opciones, seleccionar los parámetros automáticos del PID que brinda el software o seleccionar el ingreso manual de los parámetros de sintonización cuyos datos pueden ser obtenidos por cualquier método de sintonización.

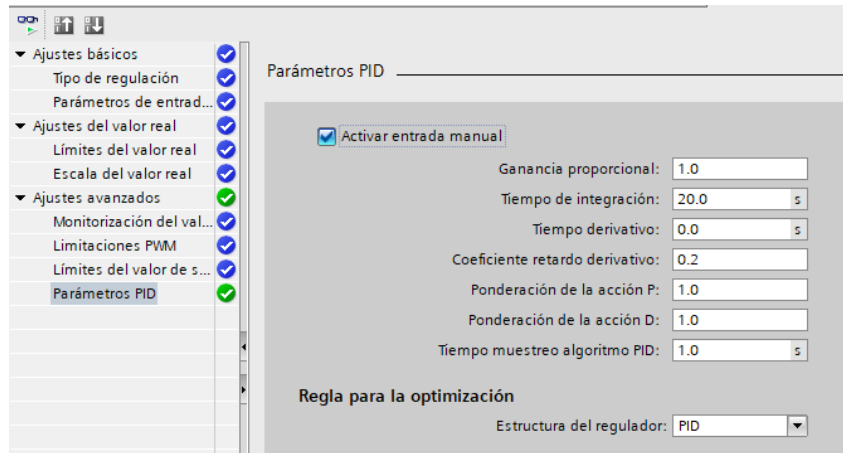


Figura XI. 17. Parámetros PID

Puesta en Servicio

Se debe estar en conexión con el PLC para poder visualizar los parámetros en la computadora, caso contrario basta con cargar el programa al PLC para que este empiece a funcionar.

1.3.HMI

1.3.1. Agregar Dispositivo HMI

El HMI permite la interacción entre el hombre y la máquina, para lo cual se debe en primera instancia seleccionar el HMI que se dispone.

Para la práctica se utilizará una KTP 700BASIC de 7" DISPLAY con serie 6AV2 123-2GB03-0AX0.

La serie del HMI se lo encuentra en el lado posterior de la pantalla, para su selección se debe realizar lo siguiente.

- a) Regresar a Agregar Dispositivo
- b) Seleccionar HMI
- c) Clic en SIMATIC Basic Panel
- d) Seleccionar las pulgadas del display, 7"
- e) Seleccionar el modelo, KTP700 Basic
- f) Seleccionar la serie, 6AV2 123-2GB03-0AX0.
- g) Seleccionar la versión más actual.

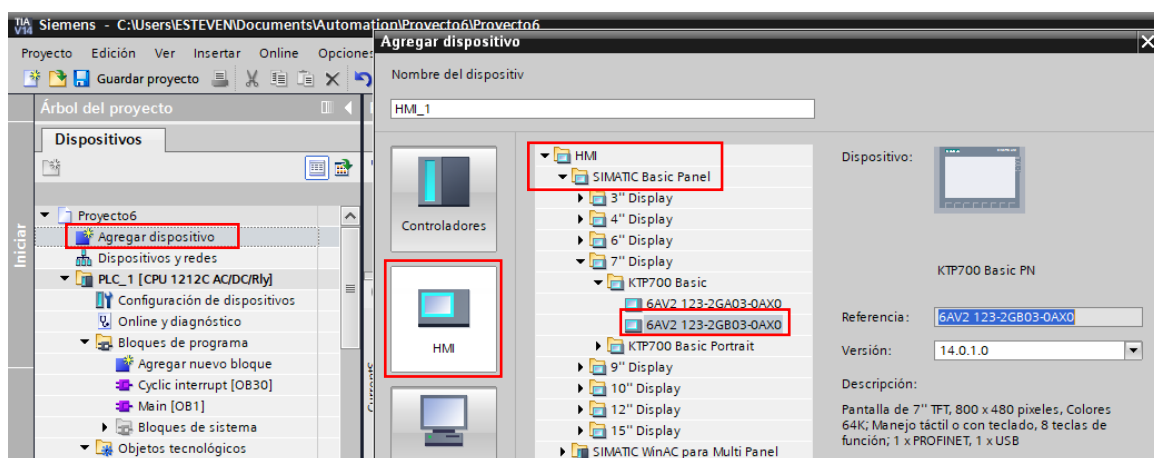


Figura XI. 18. Designación de HMI

Luego de esta selección, aparecerá una nueva pestaña, en la cual en primera instancia se debe establecer la conexión con el PLC.

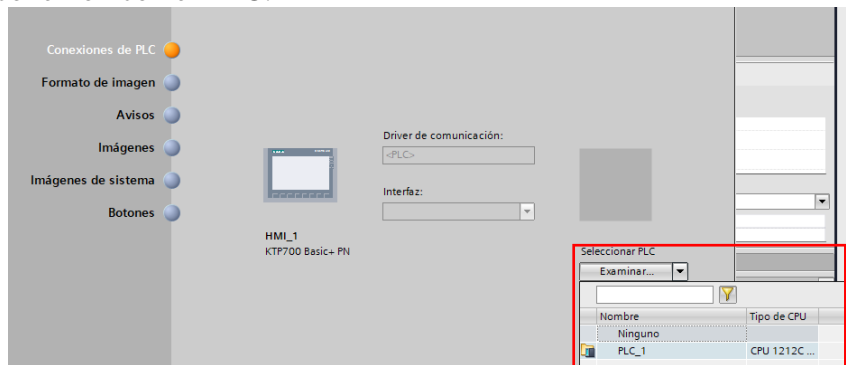


Figura XI. 19. Establecer conexión PLC

Posterior a la selección de la conexión se debe dar clic en finalizar. Con ello se ha creado un HMI listo para programar.

La primera imagen se conoce como Imagen Raíz, en la cual ya se puede programar los parámetros que se requiera visualizar. En esta imagen se realiza la programación para el control del PID.

1.3.2. Campos E/S (Visor numérico)

En primera Instancia se coloca tres Campos E/S, esto permite visualizar el valor de las variables que se les asigne, pueden ser Entrada/Salida, solo Entrada o solo Salida.

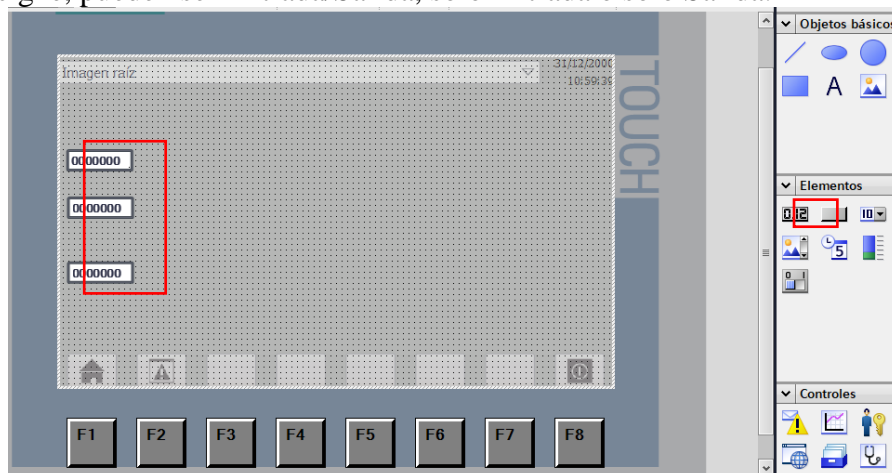


Figura XI. 20. Configuración de HMI

Para programar los Campos E/S, se debe seleccionar y en la parte inferior de la pantalla ingresar a propiedades.

Se selecciona la opción general donde aparece una nueva ventana donde en el área de proceso se determina la variable a visualizar, en el área de Tipo se determina si el Campo es Entrada/Salida, Entrada o Salida. Mientras que en el Formato se determina el formato del número y los decimales a visualizar.

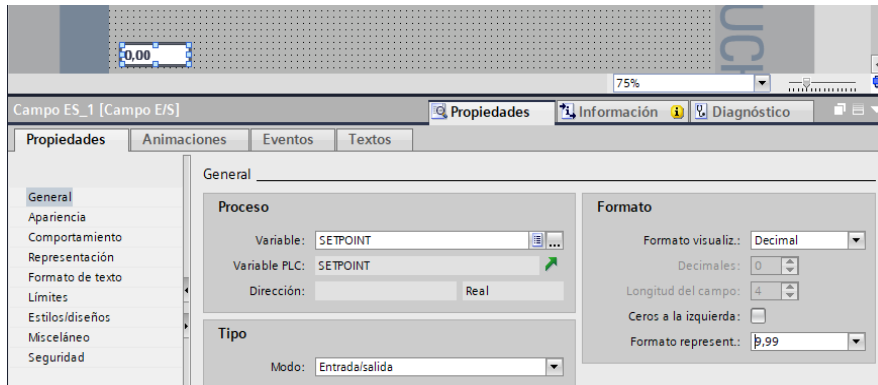


Figura XI. 21. Parámetros de programación

Cuando se requiere ingresar datos y que a la vez se visualice en la pantalla se lo debe colocar como Entrada/Salida, si la variable solo se quiere visualizar en la pantalla se recomienda que se seleccione solo Salida. Este proceso se realiza para todos los Campos E/S.

1.3.3. Visor de Curvas

En la sección de control se selecciona un Visor de Curvas, esto permitirá graficar las curvas de las variables que se las programe.

Se accede a propiedades y en Curva se van agregando las variables a representar, para cada curva se coloca su nombre, la marca en la opción de configuración y el color de la línea.

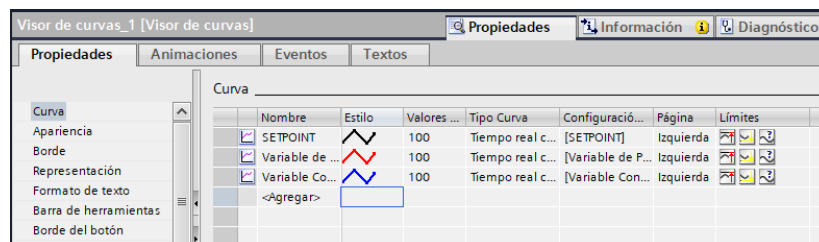


Figura XI. 22. Designación de colores de variables

Se le agrega nombre a cada una de las opciones seleccionadas y programadas.

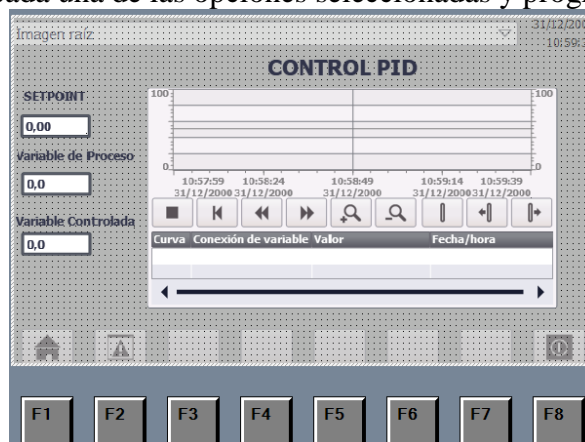


Figura XI. 23. Nombres de variables

1.4.Nueva Imagen

Se agrega una nueva imagen, donde se programa los parámetros de configuración del PID.

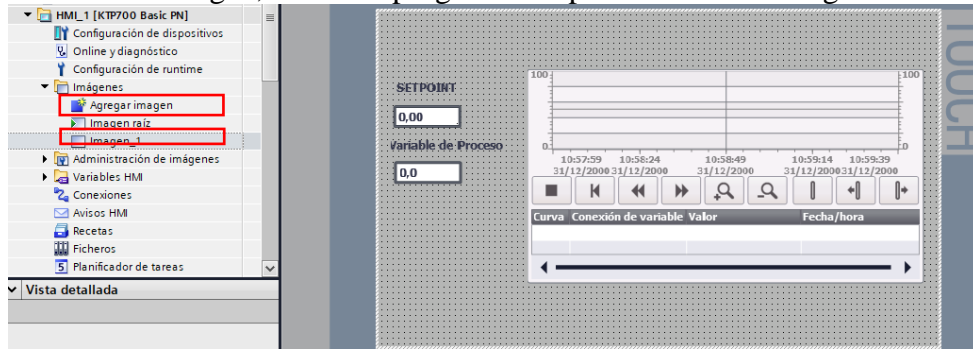


Figura XI. 24. Selección de nueva imagen

Para esto se agregan los Campos E/S o visor numérico del Setpoint y la Variable de Proceso programado en la imagen anterior, y de igual forma el visor de curva. Para esto se puede copiar de la imagen anterior.

Esto permitirá visualizar el comportamiento entre el Setpoint y la variable de proceso al cambio de los parámetros de Sintonización.

1.4.1. Parámetros de Sintonización

Para esto se agregan los Campos E/S o visor numérico de la ganancia proporcional, tiempo de integración, tiempo derivativo, esto se lo coloca para poder modificar los valores de forma fácil y visualizar su funcionamiento de manera inmediata.



Figura XI. 25. Selección de Campos E/S

Una vez realizado todos estos procesos se procede a compilar el programa y cargar al HMI, visualizando que la carga se realice sin errores, para posteriormente interactuar con el equipo.



CENTRO DE CAPACITACIÓN “CEPROIN”

Guía practica

Práctica N°	Nombre de la practica	Tiempo de práctica
1	Control PID de sistema de bombeo a presión constante	4

1. Objetivos

- Conocer por medio teórico que es un sistema de bombeo de agua presión constante y los métodos existentes para control de la variable.
- Realizar conexión eléctrica de elementos de control y accionamiento.
- Realizar control PID por medio de programación aplicando método de sintonización.
- Identificar cómo se comporta el sistema por medio de toma de datos.

2. Fundamentación teórica

Control con variador de frecuencia: La velocidad del motor de la bomba funciona de forma variable en función de la cantidad de demanda requerida por el sistema.

Control proporcional integral derivativo

En sistemas de bombeo, controlaremos la presión constante, por lo tanto, el control PID mide la diferencia entre la presión en la tubería y la presión requerida y actúa variando la velocidad del motor para mantener la presión constante dentro del sistema.

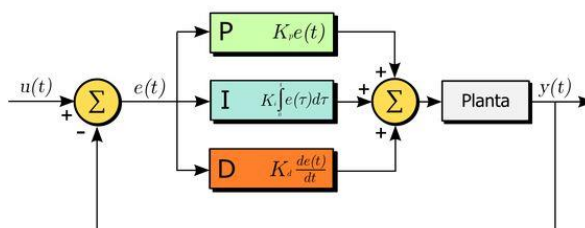


Figura XII. 1. Controlador PID

Método de Sintonía Lambda

Es un método sencillo que puede dar buenos resultados en ciertas circunstancias siempre que el parámetro de diseño se escoja adecuadamente. El método básico cancela un polo del proceso, lo que se traducirá en una pobre respuesta de las perturbaciones de carga en procesos dominados por constante de tiempo.

Equipos e instrumentos necesarios

Módulo de entrenamiento

Módulo de PLC y pantalla HMI

Variador de frecuencia

Sensor de presión

Multímetro digital

Medidas de seguridad

El personal a capacitar deberá estar al pendiente continuamente del comportamiento del sistema.

Correcta manipulación de los elementos de control.

Utilizar continuamente elementos de medición de corriente y voltaje.

Utilizar indumentaria adecuada.

Evitar el uso de elementos metálicos en el cuerpo.

Procedimiento

- a. Identificar como está constituido y el funcionamiento del módulo de entrenamiento.

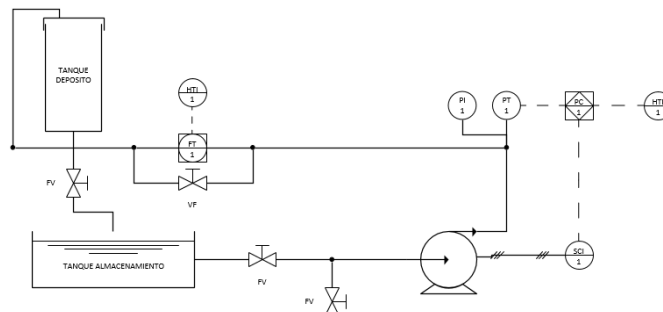


Figura XII. 2.Diagrama P&ID

b. Conexión de sensor y acondicionamiento de señal

Para la conexión del sensor se lo realiza como se indica en la figura 2, obteniendo una señal de 4 a 20 mA, por lo que se realiza un acondicionamiento de señal analógica por medio de una resistencia de 250Ω , para poder obtener una señal de voltaje misma que es envía al controlador lógico programable por medio de una entrada analógica, siguiendo el esquema de conexión de la figura 3.

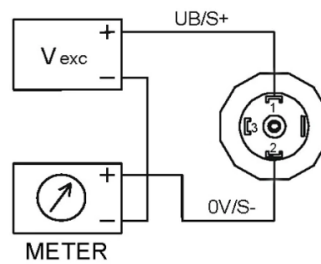


Figura XII. 3. Conexión de sensor para señal de corriente

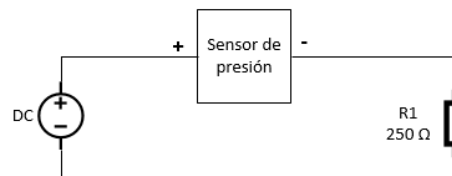


Figura XII. 4. Acondicionamiento de señal de corriente a voltaje

c. Conexión eléctrica de elementos

El módulo de entrenamiento cuenta con un panel didáctico de debidamente señalizado indicando donde realizar la conexión de los elementos, tanto de control como de accionamiento.

Una vez acondicionada la señal se procede a realizar las conexiones para el variador de frecuencia hacia la bomba y receptor la salida analógica del PLC, para poder controlar el sistema por medio de la pantalla HMI, como se muestra en la figura 4.

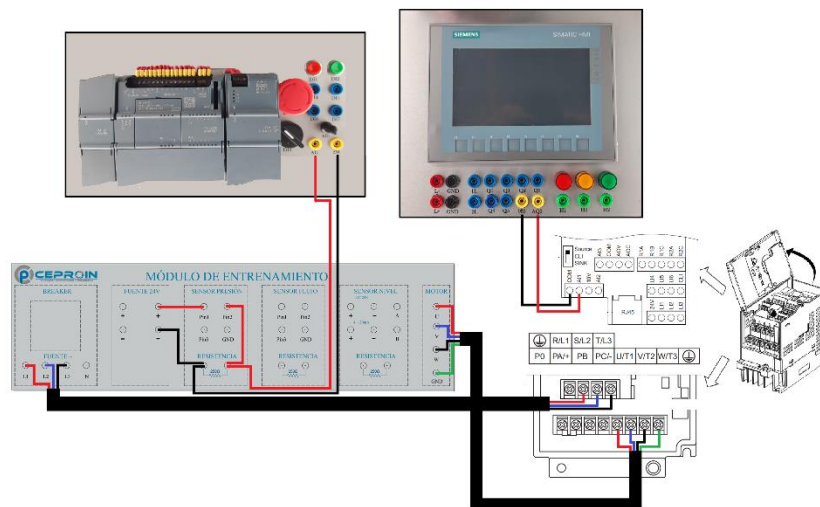


Figura XII. 5. Conexiones de equipos en el módulo

d. Parámetros de configuración del variador de frecuencia

Dentro del variador existen parámetros que se deben configurar en base a la bomba a utilizar por lo que en la figura se indica los parámetros básicos a configurar antes de la puesta en marcha, para la configuración de los parámetros se debe tomar en cuenta el HMI del variador como se ve en la figura 5.

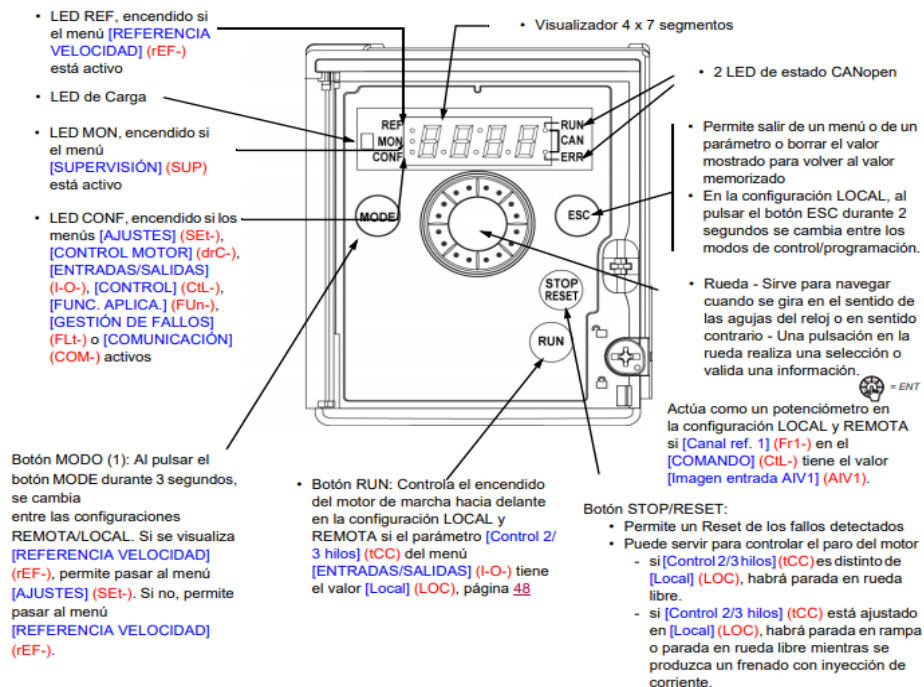


Figura XII. 6. Pantalla HMI del variador de frecuencia

e. Ajuste de los parámetros del motor

Consulte la placa de características del motor para ajustar los parámetros siguientes.

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
- 77P	<i>bFr</i>	[Frec. estándar motor]: Frecuencia estándar del motor (Hz)	50.0	60.0
	<i>unS</i>	[Tensión nom. motor]: Tensión nominal del motor en la placa de características del motor (V)	Calibre del variador	220
	<i>FrS</i>	[Frec. nom. motor]: Frecuencia nominal del motor en la placa de características del motor (Hz)	50.0	60
	<i>nCr</i>	[Int. Nominal Motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	4
	<i>nSP</i>	[Vel. Nominal Motor]: Velocidad nominal del motor en la placa de características del motor (rpm)	Calibre del variador	3600
	<i>CoS</i>	[Motor 1 cos fi]: Cos φ nominal del motor en la placa de características del motor	Calibre del variador	0.8

f. Ajuste de los parámetros básicos

Menú	Código	Descripción	Ajuste de fábrica	Ajuste de cliente
SEt -	ACC	[Aceleración]: Tiempo de aceleración (s)	3.0	3.0
	DEC	[Deceleración]: Tiempo de deceleración (s)	3.0	3.0
	LSP	[Velocidad mínima]: Frecuencia del motor con referencia mínima (Hz)	0.0	60
	HSP	[Vel. máxima]: Frecuencia del motor con referencia máxima (Hz)	50.0	60
	ITH	[I térmica motor]: Corriente nominal del motor en la placa de características del motor (A)	Calibre del variador	4
1-0-	rr5	[Asig. marcha atrás]: Asignación de marcha atrás	L 12	
Fun->PSS-	PS2	[2 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L 13	
	PS4	[4 vel. preselecc.]: Velocidades preseleccionadas	L 14	
Fun->SA1-	SA2	[Ref. sumat. 2] Entrada analógica	A 12	

g. Programación del PLC

Para el presente proyecto se debe elegir un PLC SIMATIC S7-1200, la CPU es 1212C AC/DC/RLY con serie 6ES7 212-1BE40-0XB0.

Para la programación del PLC, se debe realizar en bloques de programa, en el bloque Main [OB1].

1. Convertir el valor de set point a valor entero.

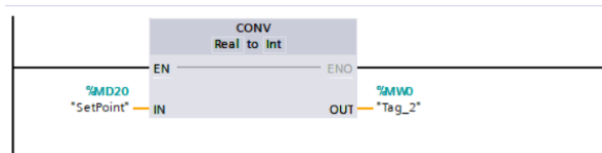


Figura XII. 7. Conversión de valor de set point

2. Realizar un normalizado y escalado de la señal para identificar el rango mínimo y máximo del voltaje entregado por el sensor.

Conversión	
1 V	2764,8
3 V	8294,4
5 V	13824
7 V	19353,6
10V	27648

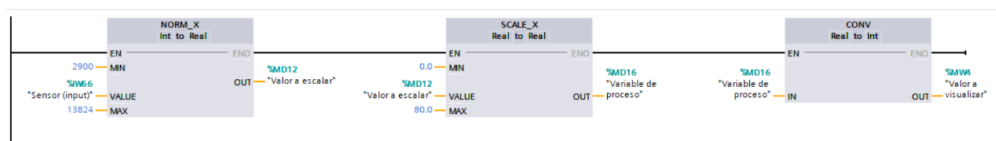


Figura XII. 8. Normalizado y escalado de señal analógica

3. Colocar la opción PID Compact, se recomienda que el PID_Compact del TIA Portal se lo programe dentro del bloque de programa Cyclic Interrupt, este bloque de programa es de clico ininterrumpido, esto permite que el PID esté funcionando independientemente de los demás programas realizados en otros bloques de programación.

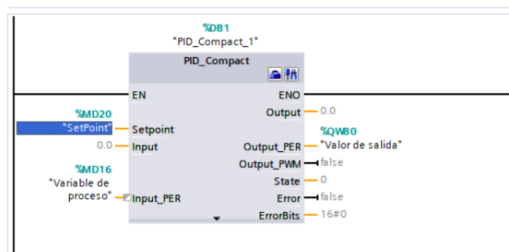


Figura XII. 9. PID_Compact

Dentro de este bloque se debe entrar a parámetros de configuración y elegir las siguientes opciones.

Tipo de regulación	Presión psi Poner Mode a: Modo manual
Parámetros de entrada	Input: Input_PER(analógica) Output: Output_PER(analógica)
Límite del valor real	Límite superior del valor real:40 psi Límite inferior del valor real: 0.0 psi
Escala de valor real	Input_PER: Activado Valor real superior escalado: 40.0 psi Valor real inferior escalado 0.0 psi Abajo: 0.0 Arriba: 40.0
Monitorización del valor real	Lím.sup.advertencia: 50.0 psi Lím.inf.advertencia: -5.0 psi
Límites de valor de salida	Lím.sup.valor de salida: 100.0% Lím.inf.valor de salida: 0.0 %
Parámetros PID	Activar entrada manual, ingresar valores calculados. Ganancia proporcional: 1.013 Tiempo de integración: 0.666 Tiempo derivativo: 0.1

h. Configuración pantalla HMI

Para la práctica se utilizara una KTP 700BASIC de 7" DISPLAY con serie 6AV2 123-2GB03-0AX0.

Para lo que se debe realizar el diseño de la pantalla colocando.

1. Campos E/S (Visor numérico)

En primera Instancia se coloca tres Campos E/S, esto permite visualizar el valor de las variables que se les asigne, pueden ser Entrada/Salida, solo Entrada o solo Salida.

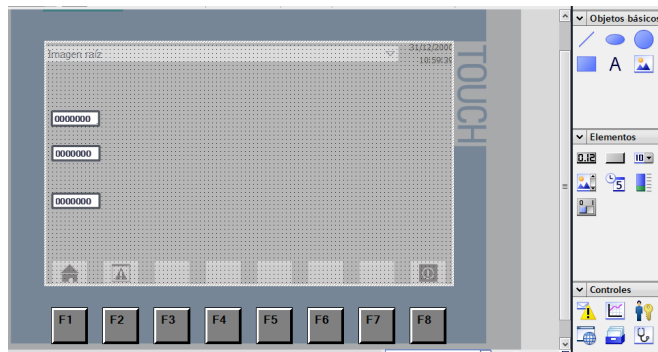


Figura XII. 10. Diseño de HMI

Para programar los Campos E/S, se debe seleccionar y en la parte inferior de la pantalla ingresar a propiedades.

En el área de proceso se determina la variable a visualizar, en el área de Tipo se determina si el Campo es Entrada/Salida, Entrada o Salida. Mientras que en el Formato se determina el formato del número y los decimales a visualizar.

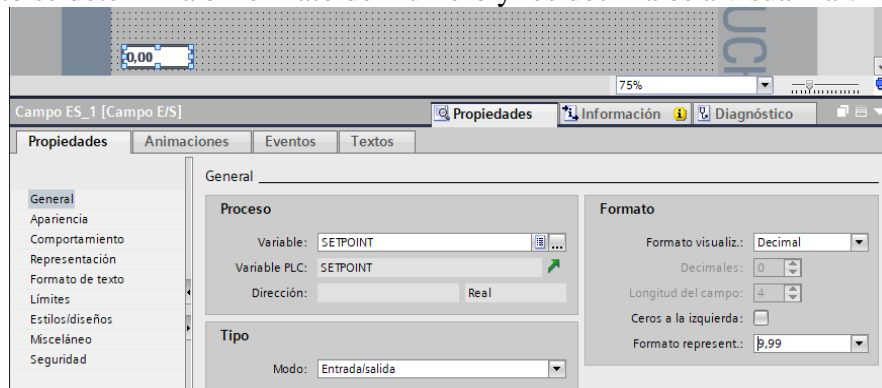


Figura XII. 11. Asignación de Campos E/S

Cuando se requiere ingresar datos y que a la vez se visualice en la pantalla se lo debe colocar como Entrada/Salida, si la variable solo se quiere visualizar en la pantalla se recomienda que se seleccione solo Salida. Este proceso se realiza para todos los Campos E/S.

2. Visor de Curvas

En la sección de control se selecciona un Visor de Curvas, esto permitirá graficar las curvas de las variables que se las programe.

Se accede a propiedades y en Curva se van agregando las variables a representar, para cada curva se coloca su nombre, la marca en la opción de configuración y el color de la línea.

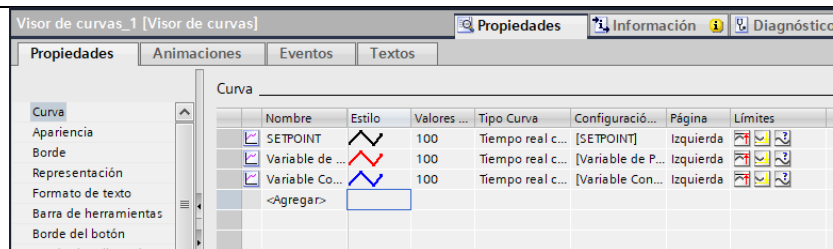


Figura XII. 12. Asignación de colores para variables

Se les agrega nombre a cada una de las opciones seleccionadas y programadas.

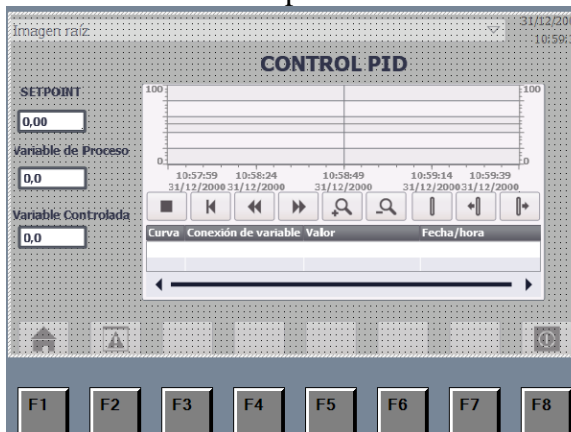


Figura XII. 13. Asignación de nombres de variables

3. Parámetros de Sintonización

Se ingresa los valores de ganancia proporcional, tiempo de integración y tiempo derivativo, una vez colocado estos parámetros se complica y carga a la pantalla HMI.



Figura XII. 14. Asignación de valores de sintonización

3. Análisis de resultados

Una vez realizada la programación se carga al PLC, y se procede a realizar pruebas para diferentes valores de set point y se procede a la toma de datos para poder visualizar el tiempo de respuesta del sistema, para esto se debe tomar diferentes valores de medida de voltaje con un mismo valor de set point.

Toma valores a válvula abierta

Set Point	Frecuencia	Voltaje sensor	Voltaje variador	Presión manómetro
0	0	0.98	0	0
5	24.1	1.27	2.01	4.9
10	33.2	1.53	2.76	10
20	48.3	2.11	4	21
30	57.3	5.54	4.74	29
32	60	5.68	5	32

Toma de valores a válvula cerrada

Set Point	Frecuencia	Voltaje sensor	Voltaje variador	Presión manómetro
0	0	0,99	0	0
5	21.1	1.3	1.77	5
10	27	1.52	2.26	10
20	39	2.11	3.24	21
32	1.99	2.69	3.97	32
48	60	3.61	5	48

Tiempo de respuesta del sistema

EL tiempo de respuesta se podrá visualizar en la pantalla HMI y compararla.

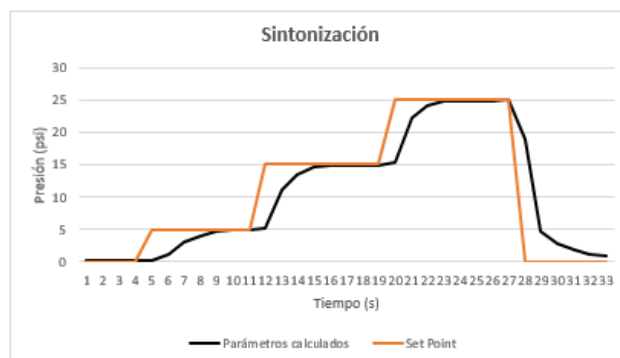


Figura XII. 15. Curva de sintonización

Conclusiones

Se puede observar que el control de la presión variando la velocidad de la bomba por medio del variador de frecuencia es útil dentro del sistema.

El sistema se comporta de diferente manera al momento de realizar las pruebas a válvula cerrada y abierta.

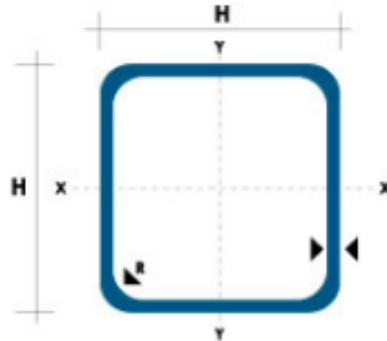
Por medio de la pantalla HMI se puede variar los tiempos derivativos e integral visualizando que sucede con el sistema.

Recomendación

Antes de poner en marcha el sistema visualizar que las válvulas este abiertas permitiendo el paso de flujo.

Realizar mediciones contantes al sistema para verificar su estado de funcionamiento.

Revisar manual de programación del variador de frecuencia para configurarlo.



DIMENSIONES		PROPIEDADES		
		ESPESOR (e)	PESO	ÁREA SECCIÓN
Pulg.	mm	mm	Kg/mt	Pulg ²
3/4"	19.05	1.2	0.5505	0.057
1"	25.4	1.2	0.8765	0.077
1 1/4"	31.75	1.2	1.1354	0.096
1 1/2"	38.1	1.2	1.3752	0.1165
2"	50.8	2	3.0142	0.1559

Nomenclatura

A= Área de selección transversal del tubo,plg².
H= Longitud lado

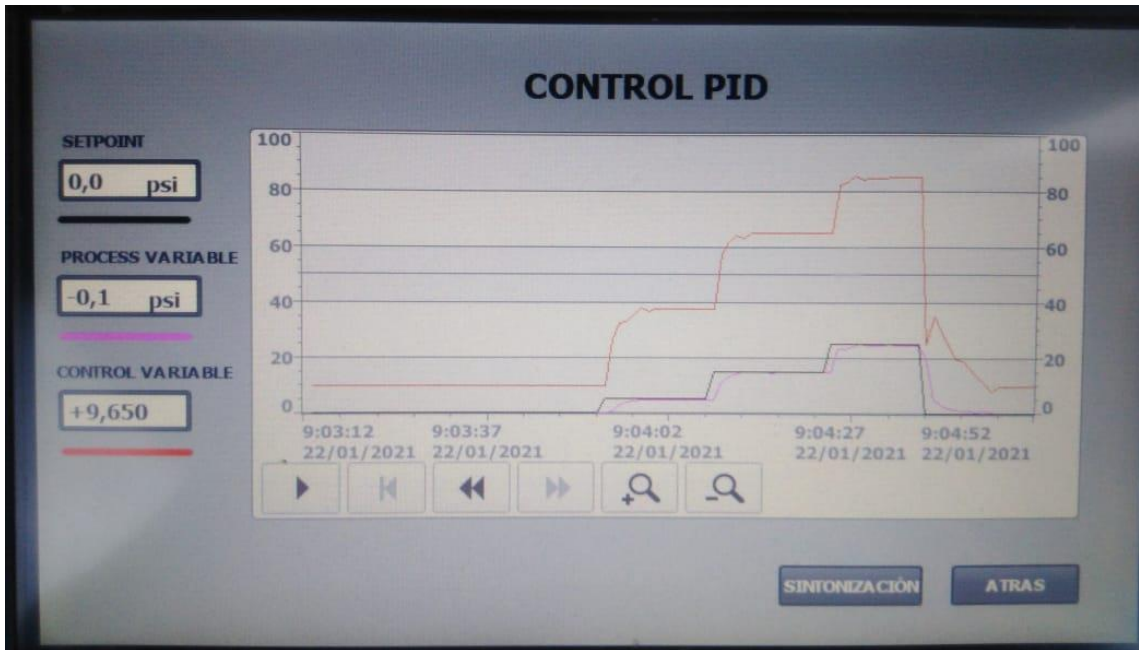


Figura XIV. 1. Curva de comportamiento del sistema en pantalla HMI



Figura XIV. 2. Curva de sintonización en pantalla HMI de PID agresivo

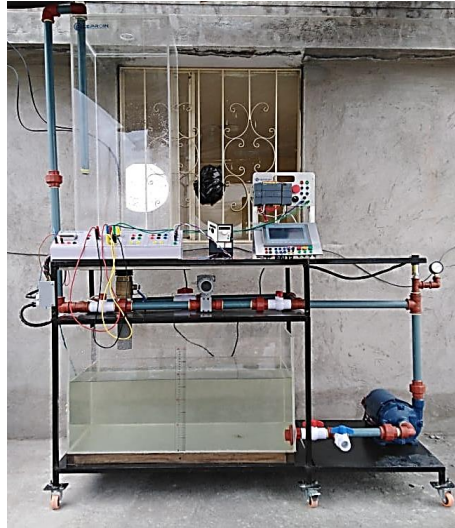


Figura XV. 1. Módulo construido final



Figura XV. 2. Módulo en funcionamiento