



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MODULO DIDÁCTICO DE UN
SISTEMA DE BOMBEO A PRESIÓN CONSTANTE PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES:

Bach. PATRICIA SOLEDAD TORRES GUERRERO

Bach. FANNY ROXANA PÉREZ CASTILLO

ASESOR:

Ing. CARLOS LEONARDO OBLITAS VERA

LAMBAYEQUE-PERÚ 2018



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MODULO DIDÁCTICO DE UN
SISTEMA DE BOMBEO A PRESIÓN CONSTANTE PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADA POR:

Bach. PATRICIA SOLEDAD TORRES GUERRERO

Bach. FANNY ROXANA PÉREZ CASTILLO

ASESOR:

Ing. OBLITAS VERA CARLOS LEONARDO



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MODULO DIDÁCTICO DE UN
SISTEMA DE BOMBEO A PRESIÓN CONSTANTE PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADO POR

Ing. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA

PRESIDENTE

MG. Ing. MARTÍN AUGUSTO NOMBERRA LOSSIO

SECRETARIO

MG. Ing. OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ

VOCAL

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a nuestra familia que siempre nos apoyo incondicionalmente en la parte moral y económica para llegar a ser un profesional.

Por el apoyo que siempre nos brindaron día a día en el transcurso de cada año de carrera universitaria.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo por habernos aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar nuestra carrera, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Agradecemos también a mi Asesor de Tesis el Ing. Carlos Oblitas Vera por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también habernos tenido toda la paciencia del mundo para guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis.

Y para finalizar, también agradecemos a todos los que fueron mis compañeros de clase durante todos los niveles de Universidad ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado en un alto porcentaje a nuestras ganas de seguir adelante en nuestra carrera profesional.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

CAPÍTULO I.....	16
ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.1. Información general	17
1.2. Planteamiento de la investigación	17
1.3. Diseño teórico.....	19
1.4. Diseño metodológico.....	21
CAPÍTULO II	22
MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Sistemas de bombeo de agua (Narvaez, 2000).....	23
2.1.1. Bombas de agua	23
2.1.2. Bombas centrífugas y parámetros hidráulicos.....	24
2.1.3. Control de presión en sistemas de distribución de agua.....	29
2.1.4. Sistema por tanque hidroneumático (control por presostatos)	32
2.1.5. Sistema de unidad motriz de velocidad ajustable.....	33
2.1.6. Selección del control del sistema de bombeo (sensores de presión o detectores de nivel). 36	
2.2. Automatización industrial.....	42
2.3. Sistemas de Control.....	43
2.3.1. Elementos en un sistema de control	44
2.3.2. Sistema de Control de Lazo Abierto.....	44
2.3.3. Sistema de Control de Lazo Cerrado.....	45
2.4. Módulos didácticos para el control de procesos industriales	46
2.4.1. Tipos de módulos didácticos de control	47
2.4.2. Módulo didáctico para el control de presión	47
2.4.3. Módulo didáctico para el control de temperatura.....	48
2.4.4. Finalidad de un módulo didáctico de control	50

2.5.	Controladores Lógicos Programables	50
2.5.1.	Clases de PLC	50
2.6.	Variador de velocidad (ABB, s.f.).....	53
2.7.	Instrumentos Industriales	55
CAPÍTULO III		63
DISEÑO DEL SISTEMA		63
3.1.	Introducción	64
3.2.	Descripción del Sistema	64
3.3.	Descripción física del sistema	64
3.4.	Funcionamiento del sistema	66
3.5.	Diagrama de bloques del sistema	66
3.6.	Identificación de Señales de Control y Monitoreo.....	68
3.7.	Selección de Equipos	69
3.7.1.	Especificación de Instrumentación.....	69
3.7.2.	Especificación del Sistema de Control.....	71
3.7.3.	Especificación del Sistema de Bombeo.....	76
3.8.	Especificaciones del Software de Programación del PLC.....	78
3.8.1.	Unity Pro	78
3.9.	Especificaciones del Software de Programación del HMI	79
3.9.1.	Vijeo Designer.....	79
3.10.	Modelado matemático	80
3.11.	Funcionamiento del Sistema.....	86
3.11.1.	Modo Manual	86
3.11.2.	Modo Automático	86
3.12.	Diagrama de fuerza del sistema.....	87
3.13.	Programa para PLC, en lenguaje LADDER	88
3.13.1.	Dimensionamiento del Bastidor	88
3.13.2.	Configuración Red Ethernet PLC.....	89

3.13.3.	Variables en el Software del PLC	89
3.13.4.	Programa para PLC	90
3.13.5.	Configuración Variador de Frecuencia	93
3.14.	Panel HMI	96
3.15.	Diseño 3D del módulo	99
3.16.	Presupuesto.....	102
CAPÍTULO IV		104
SIMULACIÓN DEL SISTEMA.....		104
4.1.	Simulación del sistema	105
CAPÍTULO V		107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción Local Box.	64
Tabla 2: Señales de control y monitoreo.	68
Tabla 3: Direccionamiento de variables en el PLC.	88
Tabla 4: Lista de parámetros para modificar.	94
Tabla 5: Costos de Hardware.	102
Tabla 6: Costos de Software.	102
Tabla 7: Costos totales.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clases y tipos de bombas.....	23
Figura 2: Curvas características H vs Q, bomba centrífuga.....	24
Figura 3: Ejemplo de presiones de líquidos.....	25
Figura 4: Cargas de fricción.....	26
Figura 5: Velocidad específica.....	27
Figura 6: Carga neta positiva de succión NPSH(Net Positive Suction Head).	28
Figura 7: Tanque elevado.....	30
Figura 8: Electrodo tipo asta.....	31
Figura 9: Electrodo tipo péndulo.....	32
Figura 10: Presostato.....	32
Figura 11: Par motor.....	35
Figura 12: Control de flujo magnético y V/F.....	35
Figura 13: Sistema con detectores de nivel.....	36
Figura 14: Sistema de variador con dos bombas.....	38
Figura 15: Carga H vs Capacidad Q.....	39
Figura 16: Flujo nominal.....	39
Figura 17: Curvas de ahorro de energía en el caballaje.....	41
Figura 18: Sistema de Control de lazo abierto.....	45
Figura 19: Sistema de control en lazo cerrado.....	45
Figura 20: Ejemplo de un Módulo Didáctico de Control.....	47
Figura 21: Diagrama Módulo Control de presión.....	48
Figura 22: Diagrama Control de Temperatura en un intercambiador de calor.....	49
Figura 23: Diagrama Módulo de Control de Nivel de líquido.....	49
Figura 24: PLC compacto S7-1200.....	51
Figura 25: PLC Modular Allen Bradley.....	52
Figura 26: PLC Compacto – Modular.....	53
Figura 27: Convertir CA entrante en CC.....	54
Figura 28: Suavizar la onda DC.....	54
Figura 29: Convertir la CC a la variable de CA.....	55
Figura 30: Calcular y repetir.....	55
Figura 31: Tubo de Bourdon sencillo.....	56
Figura 32: Medidor magnético de flujo.....	56

Figura 33: Medidor de flujo de turbina.	57
Figura 34 : Instalación de transmisores de presión diferencial en recipientes abiertos y cerrados.	58
Figura 35: Sensor de nivel con flotador.	58
Figura 36: Sensor de nivel de burbujas de aire.	59
Figura 37: Esquema de un termómetro de resistencia. a) Ensamblaje, b) Componentes.	60
Figura 38: Puente de Wheatstone de dos hilos y de tres hilos.	60
Figura 39: Construcción de un termistor típico.	61
Figura 40: Local Box 3D.	65
Figura 41: Diagrama de bloques del sistema.	66
Figura 42: Diagrama P&ID.	67
Figura 43: Sensor de Presión OsiSense	69
Figura 44: Conector XZCC43FCP40B.	70
Figura 45: PLC Modicon BMXP342020.	71
Figura 46: Módulo de entradas y salidas analógicas BMXAMM0600.	72
Figura 47: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K.	73
Figura 48: Variador de Frecuencia ACS310-03E-04A5-4.	74
Figura 49: Panel de Control Básico ACS-CP-C.	75
Figura 50: Electrobomba Pentax CST 150/2.	76
Figura 51: HMISTU855.	77
Figura 52: Logo Unity Pro XL.	78
Figura 53: Ident – Matlab.	80
Figura 54: Ident - Matlab.	80
Figura 55: Import data.	80
Figura 56: Datos experimentales.	81
Figura 57: Import Data.	81
Figura 58: Transfer Function Models.	82
Figura 59: Transfer funtions.	82
Figura 60: Programa Matlab.	83
Figura 61: Programa Matlab.	83
Figura 62: Programa Matlab.	84
Figura 63: Programa Matlab.	84
Figura 64: Programa Matlab.	85
Figura 65: Programa Matlab.	85
Figura 66: Circuito de Fuerza.	87
Figura 67: Bastidor.	88

Figura 68: Ethernet PLC.	89
Figura 69: Variables PLC.	89
Figura 70: Programa PLC.	90
Figura 71: Programa PLC.	90
Figura 72: Programa PLC.	91
Figura 73: Programa PLC.	91
Figura 74: Programa PLC.	92
Figura 75: Programa PLC.	92
Figura 76: Programa PLC.	93
Figura 77: Menú panel de control.	93
Figura 78: Parámetros panel de control.	94
Figura 79: Configuración HMI en Vijeo Designer.	96
Figura 80: Configuración HMI en Vijeo Designer.	96
Figura 81: Configuración Comunicación PLC-HMI.	97
Figura 82: Carátula HMI.	97
Figura 83: Panel principal HMI.	98
Figura 84: Panel control HMI.	98
Figura 85: Diseño 3D módulo.	99
Figura 86: Diseño 3D módulo.	100
Figura 87: Diseño 3D módulo.	101
Figura 88: Simulación del sistema.	105
Figura 89: Simulación del sistema.	105
Figura 90: Simulación del sistema.	106
Figura 91: Simulación del sistema.	106

RESUMEN

El presente proyecto de tesis tuvo como objetivo principal diseñar y simular un módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

El diseño del sistema automático, se realizó desarrollo un programa secuencial de Diagrama de Escalera (LADDER) en un PLC Modicon BMXP342020, donde manejamos 5 Variables de Entradas Discretas, 2 entradas analógica, 4 Variables de Salida discreta, 1 de salida analógica. La comunicación del PLC con el variador de velocidad ABB ACS 310 es por medio de sus puertos analógicos, el sistema será activado desde un tablero de control local. El programa en modo automático hará que la electrobomba impulse agua a la presión correspondiente de acuerdo con el largo de tubería y disposición de los aparatos sanitarios y en modo manual la velocidad de la bomba variara proporcional al giro del potenciómetro.

Se concluye; que el diseño del sistema de presión constante sirve para demostrar las competencias adquiridas en el área de automatización y control por parte de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

ABSTRACT

The main objective of the present thesis project was to design and simulate a didactic module of a constant pressure pumping system for the training of the students of the professional school of electronic engineering of the UNPRG.

The design of the automatic system was carried out by developing a sequential ladder diagram program (LADDER) in a Modicon BMXP342020 PLC, where we handled 5 discrete input variables, 2 analog inputs, 4 discrete output variables, and 1 analog output. The communication of the PLC with the ABB ACS 310 variable speed drive is through its analog ports, the system will be activated from a local control panel. The program in automatic mode will cause the pump to pump water at the corresponding pressure according to the length of pipe and disposal of sanitary appliances and in manual mode the speed of the pump will vary proportional to the rotation of the potentiometer.

It concludes; that the design of the constant pressure system serves to demonstrate the skills acquired in the area of automation and control by the students of the Professional School of Electronic Engineering of the National University Pedro Ruiz Gallo.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como finalidad diseñar y simular un módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG. Este módulo permitirá que los estudiantes puedan conocer más acerca de este proceso y así desarrollar prácticas de laboratorio en clase.

En el Capítulo I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN, se presentan los hechos preliminares que condujeron al desarrollo de la tesis tal como la situación problemática, la justificación e importancia de la investigación, los objetivos, la formulación de la hipótesis y el diseño metodológico.

En el Capítulo II: MARCO TEÓRICO, se define la base teórica que servirá para el desarrollo y sustento de la investigación, definiendo conceptos necesarios para entender el funcionamiento del módulo de sistema de bombeo a presión constante, de los instrumentos y actuadores y los PLC.

En el Capítulo III: DISEÑO DEL SISTEMA, se realiza el diseño del sistema de control, con un PLC programado en LADDER, programa para el HMI, así como la selección de equipos e instrumentos idóneos para el correcto funcionamiento del sistema, de acuerdo con las características del proceso; definimos los parámetros de diseño y evaluación del cumplimiento de estos.

En el Capítulo IV: SIMULACIÓN DEL SISTEMA, se realiza el diseño y simulación del sistema de control, con el software de programación LabVIEW versión 2009 de la empresa National Instruments.

En el Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, aparecen las razones fundamentales por las que consideramos que el desarrollo de nuestro proyecto de tesis es correcto y viable; adicionalmente, se muestran algunas recomendaciones para su mejora.

Finalmente se puede concluir que el trabajo de investigación permite aplicar por parte del alumno el correcto aprendizaje teórico y procedimientos prácticos; tales como, afianzar su conocimiento en el desarrollo del diseño y simulación de un sistema de bombeo a presión constante.

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

1.1. Información general

- **Título**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MODULO DIDÁCTICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO A PRESIÓN CONSTANTE PARA LA CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.

- **Autor**

- Patricia Soledad Torres Guerrero.
Bachiller de Ingeniería Electrónica.
- Fanny Roxana Pérez Castillo.
Bachiller de Ingeniería Electrónica.

- **Asesor de Especialidad**

Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera.

- **Línea de Investigación**

Ingeniería Electrónica – Control y Automatización.

- **Lugar**

Lambayeque.

- **Duración estimada del proyecto**

04 meses.

1.2. Planteamiento de la investigación

- **Síntesis de la situación problemática**

La Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo actualmente se encuentra en un proceso de recambio en cuanto a la formación universitaria, esto debido a la nueva ley universitaria del 2014 que busca elevar los estándares de calidad en la formación profesional.

La escuela en el área de control de procesos industriales cuenta con dos módulos, el primero de control de presión y el segundo para un control de nivel. Ambas cuentan con los equipos adecuados para su puesta en marcha.

Debido a las competencias que se busca en un egresado de la carrera profesional de Ingeniería Electrónica es importante también conocer el proceso de control de bombeo a presión constata, por lo que se hace necesario contar con un módulo para este fin.

La representación de los procesos reales en laboratorio constituye un papel muy importante en la capacitación de los estudiantes para poder responder a las expectativas del mercado laboral en el área de control y automatización.

- **Formulación del problema de investigación**

¿Cómo diseñar y simular un Módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG?

- **Hipótesis**

El diseño y simulación de un Módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante servirá para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

- **Objetivos**

Objetivo general

Diseñar y simular un Módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

Objetivos específicos

- Desarrollar el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID).
- Determinar el fabricante y equipo de acuerdo con los requerimientos de un sistema de presión constante.
- Seleccionar adecuadamente los sensores y actuadores.
- Diseñar el circuito eléctrico.
- Plantear el diseño estructural del Módulo.
- Simular el sistema.

- **Justificación e importancia de la investigación**

El mercado industrial tanto en el sector de energía y minas, construcción, entre otros hacen uso continuo de sistemas de bombeo a presión constante, Esta sería un área laboral con gran auge para nuestros estudiantes, lo cual requiere que ellos al terminar la universidad cuenten con los conocimientos sobre esta área por lo que se necesitaría que la enseñanza teórica impartida en aulas sea complementada con prácticas de laboratorio, que aporten una mayor visión de lo aprendido en clase.

El presente proyecto de tesis busca disminuir las limitaciones que tienen los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica y capacitar tanto en teoría y práctica para que los estudiantes una vez ya egresados logren afianzar sus conocimientos y así desempeñarse sin problemas en esta área laboral.

1.3. Diseño teórico

- **Antecedentes**

1. Antecedentes Nacionales

a) Diseño e implementación de un módulo demostrativo de control por variadores de velocidad para sistemas de presión constante multibombas

Se plantea utilizar la tecnología de control por variadores de velocidad y demostrar su desempeño en aplicaciones de presión constante con bombas múltiples, como lo son: el ingreso de bombas de manera secuencial y alternancia de bomba principal para equiparar el tiempo de funcionamiento entre todas. Se implementará un módulo demostrativo con dos modos de control del sistema multibombas: control de motor por bomba principal controlada y auxiliares en directo; y control del motor principal y auxiliares por variadores de velocidad enlazados por comunicación serial. Para cumplir el objetivo se requirió el diseño de un circuito de fuerza y de control, partiendo de los diagramas recomendados el fabricante, para luego pasar a la selección de los equipos a utilizar, luego al seguimiento de la fabricación y cableado; por último, se configuró el variador, creando una nueva macro de aplicación que combina los 2 modos de control multibombas. (Paredes Arévalo, 2015)

2. Antecedentes Internacionales

b) Diseño y Construcción de un Módulo de Laboratorio con Variador de Frecuencia para el Control de un Sistema de Bombeo y Determinación del Ahorro Energético

La metodología empleada para el desarrollo de la tesis ha sido mediante la programación del Relé Inteligente LOGO el mismo que permitirá controlar el Variador de Frecuencia y a través de éste al Sistema de Bombeo funcionando con mandos manuales y automáticos; en las pruebas de funcionamiento se realizan dos tipos de arranque del Sistema de Bombeo, los mismos que permitirán apreciar el desempeño de la bomba sumergible trabajando en arranque directo y posteriormente controlado por un Variador de Frecuencia. Para la determinación del Ahorro Energético se utilizó un Medidor de Energía Trifásico el mismo que al ser conectado al Sistema de Bombeo y realizar el arranque directo y arranque controlado por

Variador de Frecuencia durante un lapso de tiempo, permitirá establecer la diferencia de consumo energético entre las dos formas de funcionamiento, obteniéndose como resultados un ahorro en consumo de energía considerablemente aceptable. Mediante la variación de la frecuencia del motor de la bomba se obtienen beneficios económicos para las empresas donde se aplican los mismos, el Variador de Frecuencia debe ser manipulado por personal familiarizado con el funcionamiento de estos. red para conformar las bases del diseño de la solución. Se desarrolla las fases de diseño de acuerdo a la secuencia de los niveles inferior a superior en forma de la pirámide del modelo de referencia de automatización de sistemas CIM (Computer Integrated Manufacturing o Fabricación Integrada por computadora), en cada nivel se deja constancia de la tecnología de especificaciones de comunicación, instrumentación y automatización necesarias esto acompañado de las especificaciones técnicas de los equipos en cada caso. En el último capítulo se realiza el análisis económico en cuanto a las ventajas cuantitativas que traería la implantación del presente proyecto. (Pesántez Erazo, 2012)

c) Diseño y construcción de un módulo para laboratorio con variador de frecuencia para el control de un sistema de bombeo.

El presente trabajo se ha diseñado y construido un módulo para laboratorio con variador de frecuencia para el control de un sistema de bombeo. Los materiales empleados para la construcción del módulo de laboratorio son acero inoxidable, los elementos constitutivos empleados en el mismo son variadores de frecuencia ABB ACS 150 micrologix 1100, elementos de protección contra cortocircuitos, sistema de paro de emergencia, bomba sumergible. La metodología empleada para el desarrollo de la tesis ha sido mediante la programación del PLC micrologix 1100 el mismo que permitirá controlar el variador de frecuencia y a través de éste al Sistema de Bombeo funcionando con mandos manuales y automáticos; en las pruebas de funcionamiento se realizan dos tipos de arranque del Sistema de Bombeo, los mismos que permitirán apreciar el desempeño de la bomba sumergible trabajando en arranque directo y posteriormente controlado por un variador de frecuencia. Para la determinación del Ahorro Energético se utilizó un Medidor de Energía Trifásico el mismo que al ser controlado por Variador de Frecuencia durante un lapso, permitirá establecer la diferencia de consumo energético entre las dos formas de funcionamiento, obteniéndose como resultados un ahorro en consumo de energía considerablemente aceptable. (Vera Freire & Vera Freire, 2013)

1.4. Diseño metodológico

- **Diseño de contrastación de hipótesis**

Llevando a la práctica los conocimientos adquiridos sobre Sistemas de bombeo, Automatización de Procesos Industriales, Sistemas de Control, PLC, Sensores y Actuadores, se diseñará un módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante que permita a los estudiantes conocer el proceso de control de bombeo a presión constante. Además, se realizarán las simulaciones necesarias para comprobar el correcto funcionamiento del módulo. Con este módulo didáctico se logrará capacitar a los alumnos de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la UNPRG.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

2.1. Sistemas de bombeo de agua (Narvaez, 2000)

2.1.1. Bombas de agua

De acuerdo con la aplicación específica en la que se va a utilizar una bomba, se debe realizar su selección. La selección de la bomba adecuada para cualquier aplicación entre la diversidad de estilos, tipos y tamaños puede ser difícil para el usuario o para el contratista de construcción. Por esta razón recalcaremos que la aplicación específica de este trabajo es la distribución de agua en zonas urbanas, cuyo control de presión se realizará mediante la variación de la velocidad del sistema motriz.

Para una mejor selección del tipo de bomba se explicará a continuación los tipos y clases más comunes encontradas en el mercado; explicación que se dirigirá en su mayor parte al caso específico de este trabajo.

Clases y tipos

De acuerdo con las características del movimiento las bombas pueden clasificarse de la siguiente manera:

Centrífuga	Voluta	
	Difusor	
	Turbina regenerativas	Un solo paso
	Turbina vertical	Pasos múltiples
	Flujo mixto	
Rotatoria	Flujo axial (impulsor)	
	Engrane	
	Alabe	
	Leva y pistón	
	Tornillo	
	Lóbulo	
Reciprocante	Bloque de vaivén	
	Acción directa	Simple
	Potencia (incluyendo manivela y volante)	Dúplex
	Diafragma	Triplex
	Rotatoria -pistón	Quadruplex
		Quintuplex
		Etc.

Figura 1: Clases y tipos de bombas.

Hay que recordar que la columna de succión no debe exceder el límite máximo recomendado. La capacidad en litros por minuto (Lpm), determina el tamaño de la bomba y afecta la elección de la clase de unidad. La naturaleza del fluido es también importante en la construcción de la bomba.

En la figura 1 se encuentra un dato muy importante y de mucha utilidad para nuestra aplicación; y es el referente a la potencia de entrada, que para el caso de una bomba centrífuga⁵ depende de la velocidad específica de la misma. Este dato nos conduce a seleccionar una bomba en este tipo, pero sin dejar a un lado un análisis previo que justifique esta decisión.

Curvas características altura H vs caudal Q³ con velocidad variable.

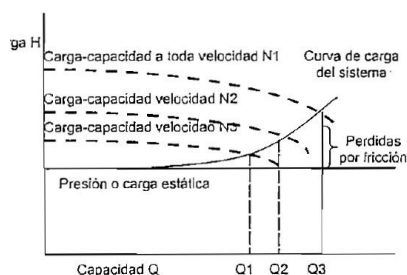


Figura 19

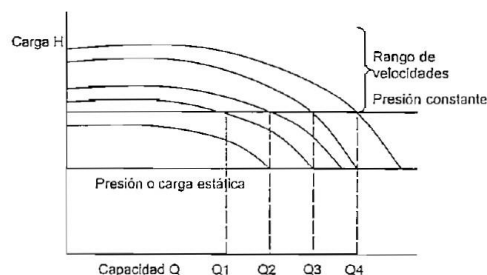


Figura 20

Figura 2: Curvas características H vs Q, bomba centrífuga.

Si se realiza un cambio de la velocidad V_n y a la vez se desea mantener una presión o columna constante H , la bomba que satisface este tipo de requisitos es la centrífuga; el rango de velocidades no es muy amplio, pero permite realizar este control con una muy buena eficiencia. En las bombas rotatorias y reciprocantes la relación H vs Q a diferentes velocidades se mantiene relativamente constante, como se ve en la Fig. 19 y 20, lo que no permite que se realice un control de presión. La convergencia de las curvas con la constante de presión proporciona un rango prácticamente nulo, lo que obliga a descartar estas dos clases de bombas y dirigir nuestro estudio prácticamente a la bomba centrífuga.

2.1.2. Bombas centrífugas y parámetros hidráulicos

La producción mundial de bombas centrífugas se encuentra alrededor del 80% respecto a las otras clases, por ser la más idónea para diferentes trabajos de conducción de líquidos o transferencia de un valor de presión o de energía estática a otro. Por esta razón es importante conocer su funcionamiento y realizar una mejor aplicación. Los parámetros hidráulicos del sistema para entender mejor.

Carga y curvas de carga del sistema

La aplicación básica de las bombas es la conducción de líquidos de un punto a otro, que implica una velocidad, distancia y altura recorrida. En el mundo físico éstos son

parámetros de energía cinética y potencial. El trabajo que realiza las bombas al conducir líquidos por tuberías y/o subirlo a más altura, es producto de la combinación de estas dos energías.

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial requeridas. La fuerza centrífuga depende de la velocidad que se encuentra en la punta de los alabes y de la densidad del líquido, en cambio la cantidad de energía que se aplica por libra de líquido es independiente de su densidad. Por tanto, una bomba que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere a éste, es la misma para cualquier líquido sin importar su densidad; de ahí, la carga o energía de la bomba en ft-Ib/Ib se debe expresar en pies (ft).

Una columna de agua fría de 2.31 ft de altura producirá una presión de 1 psi en su base. Para el caso del agua a temperatura ambiente, cualquier presión calculada en libras por pulgada cuadrada (psi) se puede convertir a una carga equivalente en pies de agua al multiplicarla por 2.31. Para líquidos diferentes del agua fría, la columna de líquido equivalente a una presión de 1 psi se puede calcular al dividir 2.31 entre la densidad relativa del líquido.

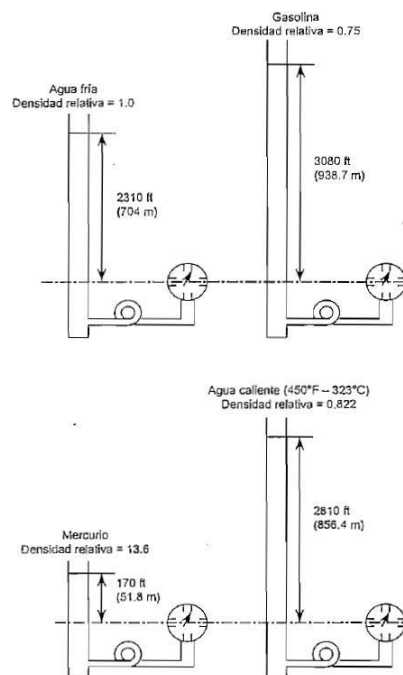


Figura 3: Ejemplo de presiones de líquidos.

Carga del sistema

Una bomba para funcionar en un sistema debe aplicar al líquido una energía formada por los siguientes componentes:

- Carga estática
- Diferencia de presiones entre las superficies de los líquidos

- Carga de fricción
- Pérdida en la entrada y la salida.

Carga estática

La diferencia entre niveles es lo que determina la carga estática. Referente a las bombas, el nivel de descarga y el de succión fijan la carga estática total aplicada.

La carga estática de descarga es la diferencia entre el nivel del líquido y la línea de centros de la bomba. Si la carga estática de succión posee un valor negativo, es debido a que el nivel de agua de succión se encuentra por debajo de la línea de centro de la bomba.

Si el nivel de líquido de succión o de descarga, está sometido a una presión que no sea la atmosférica, esta se puede considerar como parte de la carga estática o como una adición por separado a la carga estática, como se puede ver en la figura 22.

Carga de fricción

La fricción ocasionada por la tubería, válvulas y otros accesorios en el flujo del líquido obliga a que se realice un bombeo extra de no existir éste. La carga de fricción se expresa en pies del líquido que se bombea y esta pérdida varía proporcionalmente al cuadrado del flujo en el sistema.

Al calcular las pérdidas por fricción se debe tener en cuenta que éstas aumentan conforme la tubería se deteriora con el tiempo. Un promedio de vida de las tuberías en uso es de 10 a 15 años.

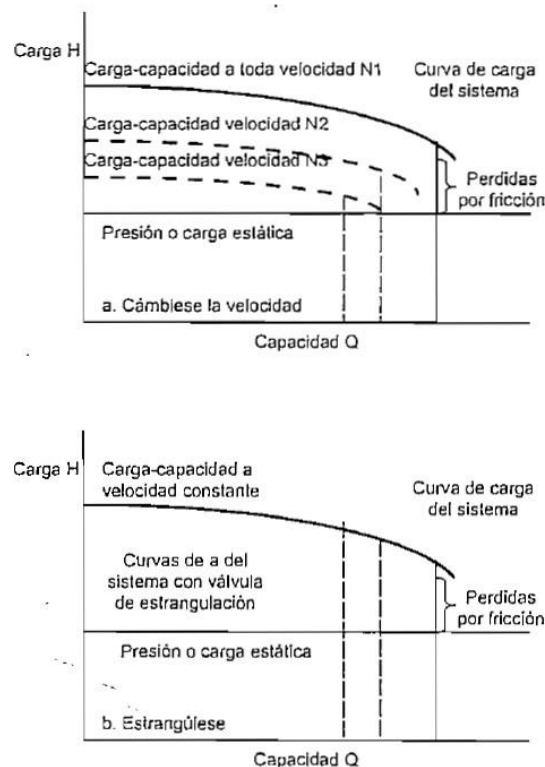


Figura 4: Cargas de fricción.

Pérdidas en la entrada y en la salida

La magnitud de las pérdidas depende del diseño de la entrada al tubo. Una boca acampanada bien diseñada y construida produce la mínima pérdida; esto es en el punto de succión. En el lado de descarga, cuando el tubo termina en algún cuerpo de líquido, se pierde por completo la carga de velocidad del líquido y se debe considerar como parte de las pérdidas totales por fricción en el sistema.

Velocidad específica

La velocidad específica es un indicador útil para tener una idea general del tipo de bomba que se debe seleccionar. El principio de la similitud dinámica, cuando se aplica a una bomba centrífuga, indica que dos bombas de configuración similar tendrán características semejantes de funcionamiento.

La relación entre las características de rendimiento, capacidad, carga y velocidad de rotación determinan lo que se denomina 'Velocidad específica', y se define como sigue:

$$N_s = (NQ)/HA^{3/4}$$

en donde N es la velocidad en rpm, Q es la capacidad o caudal (gpm) y H es la carga (ft).
(ver figura 24)

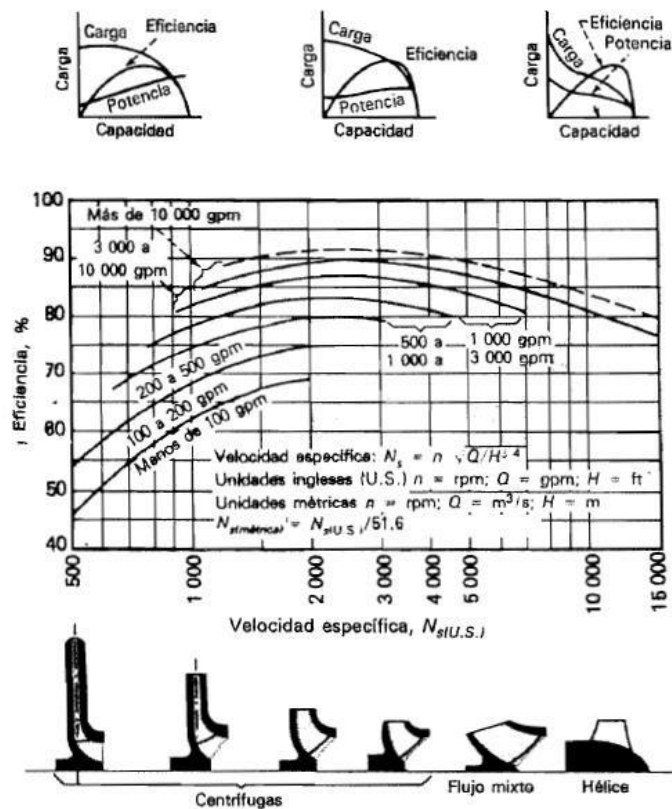


Figura 5: Velocidad específica.

Carga neta positiva de succión

Todas las bombas requieren determinada carga neta positiva de succión NPSH, para permitir que el líquido fluya a la carcasa de la bomba. Este valor lo determina el diseñador de bombas y se basa en la velocidad de rotación, la superficie de admisión o del ojo del impulsor en una bomba centrífuga, el tipo y número de alabes en el impulsor, etc.

La carga neta positiva de succión se clasifica en disponible y requerida y éstas varían con la capacidad, como se indica en la siguiente figura:

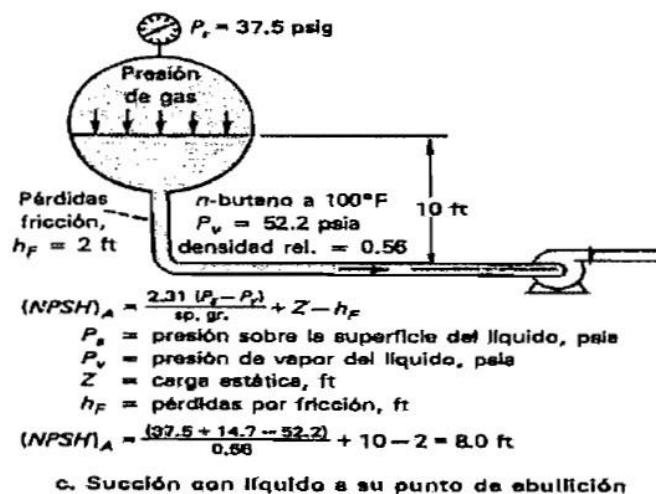
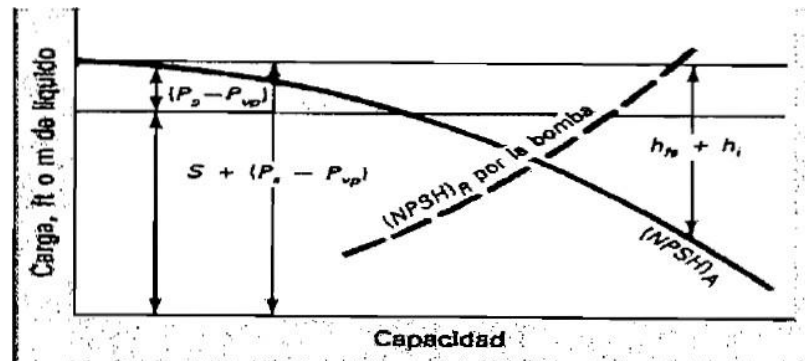


Figura 6: Carga neta positiva de succión NPSH(Net Positive Suction Head).

La NPSH requerida representa la diferencia entre la carga absoluta de succión existente y la presión de vapor a la temperatura prevaleciente. La NPSH requerida es en función del diseño de la bomba, y representa el margen mínimo requerido entre la carga de succión y la presión de vapor.

Cuando se bombea líquidos, nunca se debe permitir que la presión en cualquier punto dentro de la bomba caiga a menos de la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

Siempre se debe tener suficiente energía disponible en la succión de la bomba para hacer que el líquido llegue al impulsor y contrarreste las pérdidas entre la boquilla de succión y la entrada al impulsor de la bomba.

Cavitación

La cavitación ocurre cuando la presión absoluta dentro de un impulsor cae por abajo de la presión de vapor del líquido y se forman burbujas de vapor. Estas se contraen más adelante en los alabes del impulsor cuando llegan a una región de presión más alta.

La coordinación con la NPSH requerida mínima, la cual se define como la diferencia entre la carga absoluta de succión y la presión de vapor del líquido bombeado a la temperatura de bombeo, evitan la cavitación.

La cavitación se nota cuando hay una o más de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en las curvas de capacidad de carga y eficiencia.

2.1.3. Control de presión en sistemas de distribución de agua.

La calidad en el servicio es el objetivo primordial en un sistema de distribución de agua. El hombre a lo largo de los años se ha ingeniado la forma de satisfacer esta necesidad implementando los más diversos sistemas para llevar el flujo a todos los consumidores y en condiciones muy similares. Como se mencionó anteriormente dependerá mucho de la aplicación a la que va a ser expuesto.

Para el caso particular de un sistema de distribución de agua potable en zonas urbanas, objeto de este trabajo, los tipos de control más utilizados son:

- Sistema por tanque elevado (control por detectores de nivel)
- Sistema por tanque neumático (control por presostatos, rango de presión)
- Sistema mixto (tanque neumático y elevado, control por presostato y detector de nivel)
- Sistema de unidad motriz de velocidad ajustable

Sistema por tanque elevado (control por detectores de nivel)

El sistema por tanque elevado como su nombre lo dice, consiste en llevar el agua a un tanque de almacenamiento ubicado a una altura superior que la del consumidor más alto desde el punto de referencia; y desde aquí, se envía el agua al sistema de distribución por gravedad.

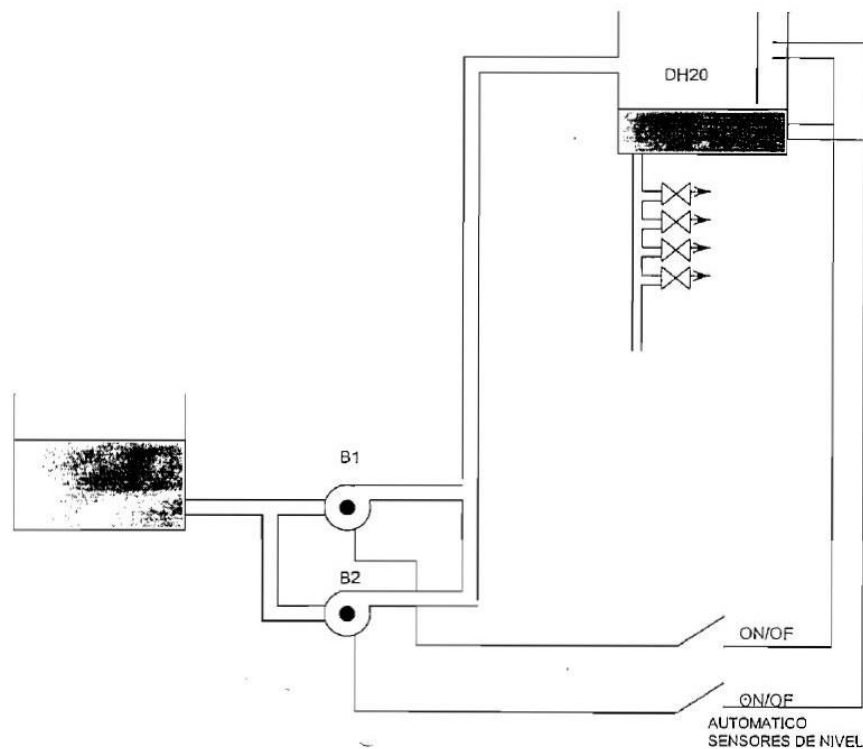


Figura 7: Tanque elevado.

Este sistema es muy utilizado en edificios y ciudades. En edificios, el tanque siempre se encuentra en la terraza, en la toma de agua se encuentra una cisterna desde la cual la bomba envía el fluido hacia, el tanque elevado. El llenado de este es controlado por detectores de nivel mínimo y máximo, que produce una columna variable de agua durante el consumo; y consecuentemente, una variación de la presión en cada uno de los consumidores. Normalmente esto se traduce en molestia para los usuarios, como es el no llenado en cisternas de baño, corte continuo en duchas, falta de presión en lavado, entre otros.

Detectores de nivel

El control de una bomba en un tanque elevado se encuentra gobernado de acuerdo con el nivel de agua que se encuentre en éste, si el nivel se encuentra en un mínimo ajustado, se da la orden de encendido de la bomba hasta llegar a un nivel prefijado como máximo, donde se detiene la bomba.

Este sistema consiste en tres electrodos (E_s =superior, E_i =inferior, E_r =referencia) que controlan el nivel de agua. El electrodo de referencia " E_r " debe estar instalado bajo el nivel

mínimo o colado en la carcasa del reservorio si éste fuese de metal o estuviere aterrado. Jamás debe utilizarse el mismo electrodo para el control de dos aparatos o más.

Aplicando tensión entre "Er" y "Ei" cuando existe un líquido entre ellos, circula una corriente de acuerdo con la conductividad del líquido, ésta activa el control para que exista un bombeo de líquido y cuando el nivel de líquido llega al nivel "Es" circula una corriente entre "Er" y "Es" eliminando el control de bombeo. Los electrodos más comunes son los tipos asta y péndulo:

Electrodo tipo asta

Poseen una rosca de fijación (3/4" BSP) y se encuentra aislado con teflón, revestido en acero inoxidable 303/304, se encuentra alrededor de 300mm, su montaje se lo realiza en la parte inferior y superior del tanque.

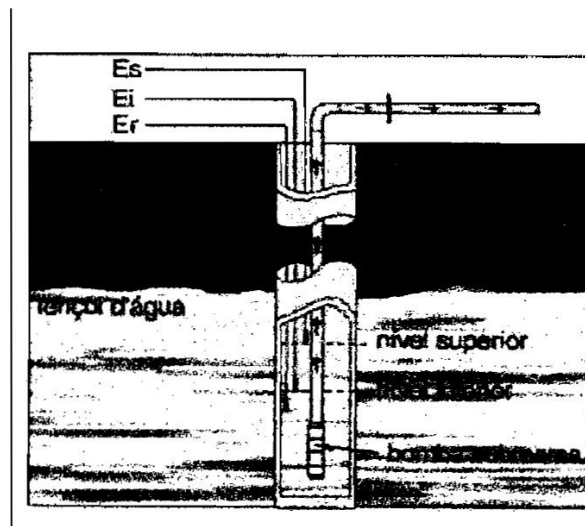


Figura 8: Electrodo tipo asta.

Electrodo tipo péndulo

Este electrodo se encuentra constituido de un bastaje metálico revestido de acero inoxidable 303/304 al igual que una carcasa de ABS que permite el aislamiento eléctrico. El electrodo permanece pendulado dentro del reservorio. Se recomienda colocarlo dentro de un tubo de PVC para evitar perturbaciones del líquido o turbulencia.

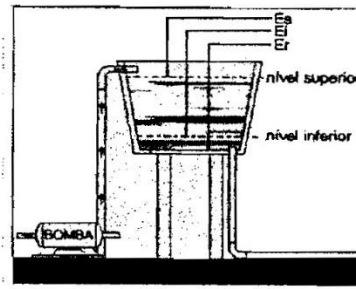


Figura 9: Electrodo tipo péndulo.

2.1.4. Sistema por tanque hidroneumático (control por presostatos)

El tanque hidroneumático recepciona el líquido a presión dentro de su cámara, lo mantiene dentro del mismo y lo desaloja de acuerdo con el consumo. En forma similar que el sistema anterior por detectores de nivel, este sistema basa su control entre 2 puntos, mínimo y máximo, que en este caso es de presión de llenado del tanque hidroneumático. En este caso la bomba de agua obedece a la señal de mínima presión que envía el presostato y es desactivada el momento que llega a la presión máxima prefijada.

La aplicación de los tanques hidroneumáticos se encuentra restringido a zonas de abastecimiento relativamente pequeñas como son en casas y edificios medianos.

Presostatos

Son dispositivos accionados mecánicamente por muelles (resortes) calibrados a diferentes presiones de entrada, presión mínima y presión máxima y adicionalmente poseen un bloque de contactos auxiliares que responden a dicha señal de presión enviada por los muelles, (ver fig. 29)

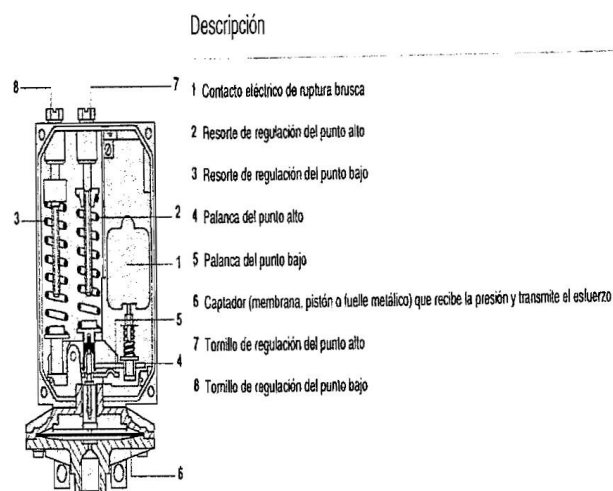


Figura 10: Presostato.

2.1.5. Sistema de unidad motriz de velocidad ajustable

Las bombas convencionales de una velocidad y los sistemas de válvula de estrangulación, cuando operan a menos de su capacidad de diseño desperdician energía. Las pérdidas por caída de presión se pueden evitar si la unidad motriz es de velocidad variable. En el pasado, en las plantas de proceso el flujo de líquido se regulaba por lo general con la estrangulación, en donde se hacía funcionar la bomba a plena velocidad y se restringía el flujo con una válvula de control para variarlo; pero esto daba lugar a un gran desperdicio de

energía. Este tipo de control se puede comparar como la conducción de un automóvil con el pedal del acelerador a fondo, y luego ir aplicando el freno y oprimiendo el embrague a medias para regular la velocidad.

Tipos básicos de unidades motrices de velocidad ajustable. El uso de unidades motrices de velocidad ajustable en los procesos industriales es muy amplio. Muchos tipos de bombas (centrífugas, de desplazamiento positivo, de tornillo, etc.) y ventiladores (enfriamiento de aire, torres de enfriamiento, calefacción y ventilación, etc) así como mezcladoras, transportadoras, secadoras, calandrias, trituradores y ciertos tipos de compresores, sopladores y agitadores, se impulsan mediante unidades motrices de velocidad ajustable.

Por lo general, las unidades motrices de velocidad variable utilizadas en la industria de procesos son menores de 500 HP, y se distinguen entre los principales cinco grupos:

- c.a. de estado sólido
- c.c. de estado sólido
- mecánicas
- electromecánicas
- fluidas.

Cada uno de estos tipos posee sus características propias de control; sin embargo, si el objetivo primordial es el ahorro de energía, el control de la unidad motriz se debe realizar con el sistema de ca ó cc de estado sólido.

Las unidades motrices mecánicas poseen bandas sencillas y poco costosas, su funcionamiento es suave y pueden absorber cargas de choque considerables, además el mantenimiento es sencillo.

En aplicaciones en donde en donde se requieren cambios precisos y rápidos en la velocidad, son adecuados los embragues electromecánicos. Al variar el deslizamiento, las unidades

motrices electromecánicas producen control indirecto de algunas variables como son velocidad, posición y potencia.

El motor eléctrico de rotor devanado es similar al de inducción tipo jaula de ardilla, excepto que el rotor tiene sus devanados conectados a tres anillos colectores (deslizantes o rozantes). El control externo de las resistencias en los circuitos de rotor y anillos colectores permite que el motor funcione como unidad motriz de velocidad variable. Cuando se aumenta esa resistencia se reduce la velocidad del motor, la corriente enviada a través de los resistores se convierte en calor, que se disipa como pérdida por deslizamiento.

Las unidades motrices hidro viscosas son ideales para aplicaciones de funcionamiento continuo y de alto caballaje. Pueden funcionar en lugares con grandes variaciones de temperatura y en donde hay partículas abrasivas. Otra ventaja de dichas unidades hidro viscosas y de todas las fluidas es su seguridad inherente. Debido a que el par se transmite por el líquido no hay piezas deslizantes que produzcan chispas y su funcionamiento es muy suave.

Unidad motriz controlada con variador de frecuencia de corriente alterna

A pesar de que los controladores de frecuencia variable son complejos, los motores de corriente alternan jaula de ardilla no lo son; y precisamente esta sencillez hizo que los diseñadores pudieran mejorar el rendimiento de esos sistemas de control.

El motor de inducción jaula de ardilla es más ligero, pequeño, fuerte y menos costoso que sus similares de corriente continua. No tiene escobillas ni conmutador que se gasten y produzcan chispas. Además, las mejoras en la eficiencia de los últimos años han hecho más deseables a este tipo de motores de ca. Los pequeños funcionan con 90% o más de eficiencia y los grandes con más del 96%.

Desde hace unos seis o siete años atrás, los controladores de corriente alternan se han perfeccionado, con la introducción de una nueva generación basada en transistores de potencias grandes en lugar de los SCRs, que presentaban ciertos problemas en la conmutación.

Dimensionamiento de los variadores de frecuencia de CA

El factor más importante que se debe tener en cuenta es la corriente de servicio continuo y de corta duración. Los elevados pares de arranque requieren corrientes muy altas que pueden exceder la capacidad del variador, pero éstos al ser relativamente de corta duración son posibles de soportar. El aspecto clave que se debe conocer para determinar el tamaño de un variador es la corriente a plena carga a velocidad base, o sea la corriente

necesaria para que el motor del tamaño correcto funcione en las condiciones previstas de carga.

La variación de la frecuencia y del voltaje en los variadores de velocidad de estado sólido es una de las características primordiales de estos equipos. El voltaje se varía junto con la frecuencia de modo que la densidad de flujo en el entrehierro y por tanto, el par producido por el motor se pueda controlar

$$\text{Par} \propto \phi \text{ entrehierro}$$

$$\phi \text{ entrehierro} \propto \text{Volts/Hertz}$$

Figura 11: Par motor.

En los últimos tres años se ha perfeccionado el control del vector de flujo magnético obteniéndose mejores resultados en cuanto al establecimiento del torque a diferentes velocidades. Por ejemplo, en el variador de frecuencia de la MITSUBISHI modelo FR-A se pueden obtener las siguientes ventajas con el control del vector de flujo magnético:

Torque constante durante la aceleración y desaceleración en un rango de frecuencias de 1Hz a 60Hz. Los tiempos de aceleración y desaceleración también pueden ser reducidos.

- El torque del motor es incrementado durante la operación de baja velocidad. Torque de 150% en el motor pueden ser obtenidas a frecuencias de 1Hz y evitan el problema de tener un bajo torque a velocidades muy pequeñas.
- Es posible obtener un monitoreo del torque y velocidad actual. En la fig. 12 se pueden observar y hacer una comparación entre estos dos tipos de controles.

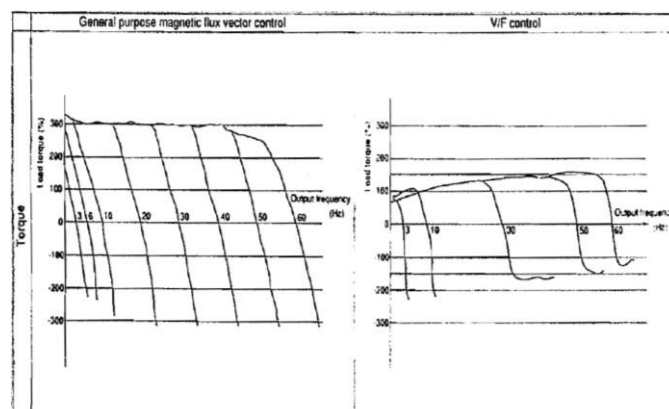


Figura 12: Control de flujo magnético y V/F.

La capacidad de mantener el torque constante y mejorar las características de aceleración y desaceleración influye considerablemente en los sistemas de bombeo.

Una aceleración y desaceleración suave, efectiva y continua conlleva a mantener los materiales durante más tiempo, las tuberías son expuestas a menor presión debido a la eliminación del golpe de ariete por paradas o arranques bruscos inherentes a los controles on-off.

El ahorro de energía obtenido con variadores de frecuencia al no encender bruscamente a carga nominal, sino entregando la energía necesaria de acuerdo al consumo, es un factor económico importante en la decisión final de utilizar uno u otro sistema.

2.1.6. Selección del control del sistema de bombeo (sensores de presión o detectores de nivel).

La selección o remplazo de un sistema de control de bombeo a otro, lleva a realizar un análisis técnico - económico de ventajas y desventajas que éstos involucran. Para concretarnos en un ejemplo específico analizaremos los sistemas de bombeo controlados por variadores de frecuencia regulados por sensores de presión y los sistemas de bombeo de tanque elevado regulados por detectores de nivel. Los sistemas de bombeo convencionales ocupan motores de una velocidad y cuando éstos operan a menos de su capacidad de diseño, desperdician energía.

Las pérdidas por caída de presión se pueden evitar si la unidad motriz es de velocidad variable. Imaginemos una estación de bombeo de red municipal de aguas, como indica la figura 31

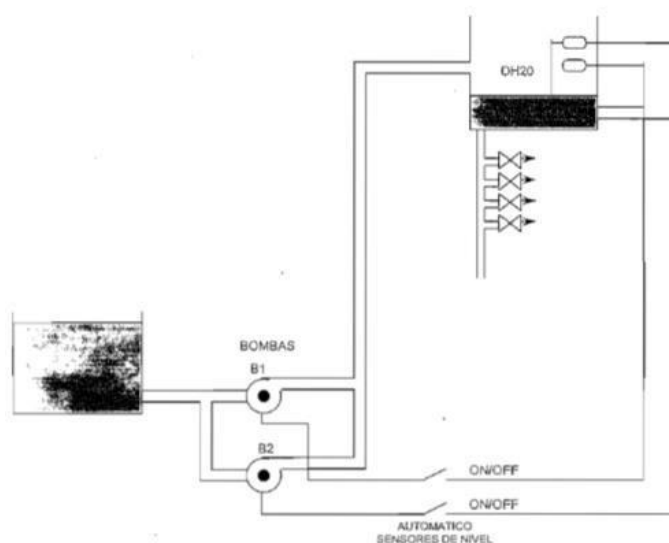


Figura 13: Sistema con detectores de nivel.

Supongamos que la distribución es óptima cuando la altura de agua en el tanque de almacenamiento es de 20 metros, y que disponemos de 2 bombas como es en la mayoría de los casos de la vida real.

Un par de sensores de nivel (on-off) por cada una de las bombas controla el bombeo en la marcha o paro de los motores eléctricos, la presión es determinada por la diferencia de altura entre los niveles. Si la altura de presión óptima es de 20 metros, en el tanque se ajusta un delta en la altura de ± 4 metros, donde se colocan los detectores de nivel.

Esta variación de alturas provocaría una evidente diferencia de presiones en el consumidor final, que se traduce en un mal servicio de entrega.

El cálculo del rango de presiones en este tipo de sistemas es muy sencillo:

- Presión máxima: altura de columna de agua máxima 24 metros = 2.4 Kg/cm²
- Presión media: altura de columna de agua medía 20 metros = 2.0 Kg/cm²
- Presión minina: altura de columna de agua mínima 16 metros = 1.6 Kg/cm²

Al variar la demanda por consiguiente cambia la presión en el tanque. La rapidez de respuesta depende de la capacidad de las bombas para llenar el tanque a su nivel óptimo, o a su vez para llegar del nivel mínimo al máximo determinados por los detectores de nivel.

Los detectores de nivel al poner en marcha y paro los motores de las bombas originan grandes golpes de ariete, malgastando grandes cantidades de energía. Al tener los detectores de nivel un control on-off, las bombas entran a funcionar a su máxima capacidad al igual que a detenerse con una parada brusca, esto provoca esfuerzos en la tubería y en la bomba para mantener la altura constante y prevenir el excesivo consumo de los motores de las bombas, se puede utilizar la regulación por variadores de frecuencia.

En la figura se puede observar como reemplazaría el sistema por variadores de frecuencia controlado por sensores de presión, al sistema por detectores de nivel representado en la figura anterior.

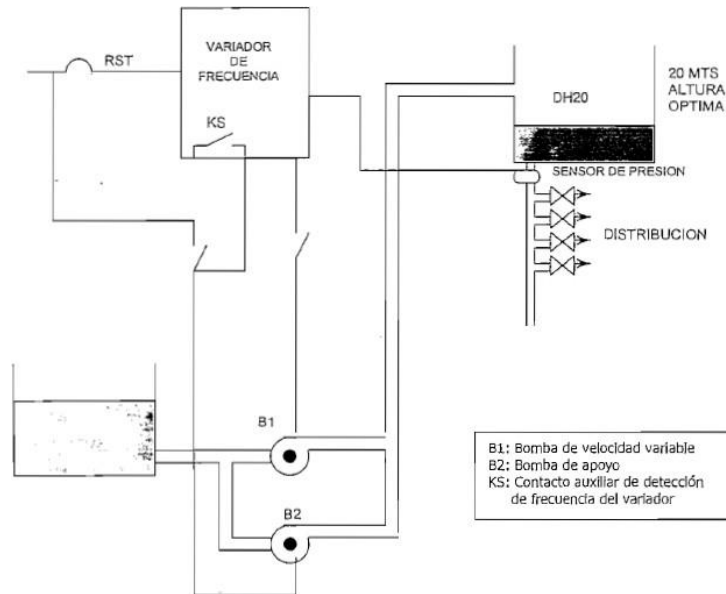


Figura 14: Sistema de variador con dos bombas.

El variador de frecuencia de acuerdo con la presión requerida y previamente fijada ajusta la velocidad del motor de una de las bombas y conecta y desconecta automáticamente la otra bomba.

Las bombas mantienen la altura constante sin importar cuanto varíe el consumo. El accionamiento con un variador de frecuencia nos da un control completo y preciso del proceso.

Ventajas de la regulación con variador de frecuencia

a) La presión en la tubería se mantiene constante.

En el sistema con detectores de nivel y para el caso del ejemplo anterior, entre el nivel máximo y mínimo existe una variación de 0.8 Kg/cm²; en cambio con el sistema de variadores de frecuencia la variación entre el nivel máximo y mínimo que toma la columna de líquido solo depende de la velocidad de respuesta del sistema, es decir, de la aceleración o desaceleración de la unidad motriz; valores que pueden ser ajustados en el variador gracias a su gran flexibilidad. En el sistema de variadores, la presión de la columna de salida varía alrededor de un +/-5% del valor óptimo fijado para distribución, porcentaje que depende del tiempo fijado en la aceleración y desaceleración del sistema.

Respecto a las tuberías de llenado del tanque, en un sistema por detectores de nivel, al arrancar las bombas bruscamente y al encontrarse el líquido en el nivel mínimo el caudal entregado por la bomba y consecuentemente la carga del motor será la nominal; mientras que al utilizar el variador de frecuencia primeramente se obtendría un arranque suave con el tiempo de aceleración fijado, las cargas entregadas al sistema serán menos drásticas que al entrar a funcionar con una velocidad fija, como se indica en la figura 33.

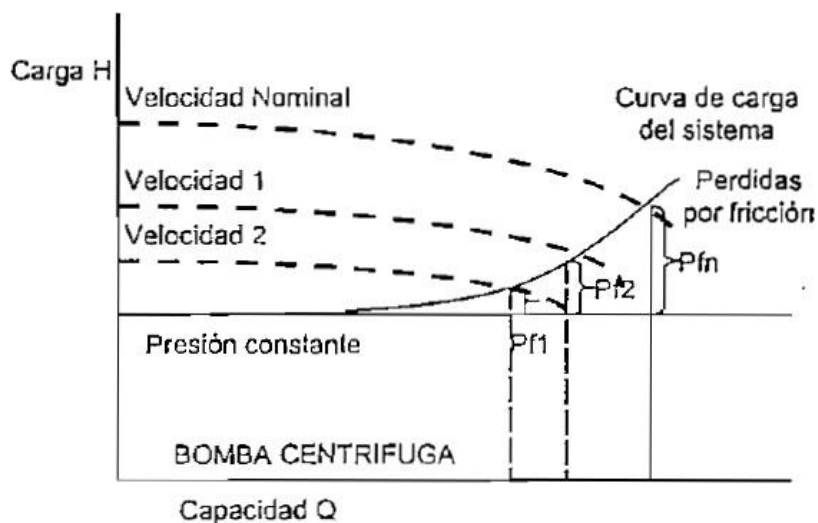


Figura 15: Carga H vs Capacidad Q .

Al obtener un arranque suave y llegar a la capacidad nominal solo si es necesario, las pérdidas por fricción disminuyen y las tuberías no son expuestas continuamente a la carga y presión total del sistema.

b) El mayor rendimiento de la energía empleada disminuye el costo de operación.

Los diferentes caudales que se pueden obtener de una bomba y los diferentes sistemas de fricción se pueden resumir en la siguiente figura:

flujo nominal %	100% F	75% F	50% F	25% F
100	21	16	9	3
87.5	38	31	20	12
75	57	47	35	20
50	81	69	55	41

Fuente: Hidrocarbo Proc. Septiembre 1.979

Figura 16: Flujo nominal.

Con la figura anterior se puede calcular fácilmente los ahorros de energía, se puede evaluar la rentabilidad de una inversión más elevada en un sistema de velocidad variable al comparar el costo adicional de ese equipo con la reducción en los gastos de operación. Ilustraremos la utilización de esta figura con un ejemplo:

Una bomba centrífuga de 40 HP de motor a una sola velocidad en un sistema de fricción de 75% con una carga de 37HP con el caudal de diseño y un costo de electricidad de 3.5 centavos de dólar por KWh y un ciclo de trabajo del 100% al 100% del caudal de diseño con horas de operación del 77 % respecto al sistema de variación de velocidad. En cambio, al funcionar con variador de frecuencia presenta un ciclo de trabajo de la siguiente manera, 25 % al 100% del caudal de diseño, 16.66% al 87.5%, 25% al 75% y el 33.33 % al 50% del caudal de diseño.

Si HPd son los HP de diseño, op como las horas de funcionamiento, c el costo de energía y E la eficiencia de la bomba.

Sistema de velocidad fija:

$$HPd = 37 \text{ HP}$$

$$op = 8760 * 0.77 \text{ h/año para sistema de bomba de una sola velocidad } 8760 \text{ h/año para sistema de velocidad variable}$$

$$c = 35 \text{ centavos de dólar } E = 37/40 = 0.925$$

Entonces el costo de operación del sistema de velocidad fija es:

$$\$ = (0.746 * HPd / E) * op * c$$

$$S = (0.746 * 37 / 0.925) * 6745.2 * 0.035$$

$$\$ = 7044.6868 \text{ dólares al año Sistema de velocidad variable:}$$

$$\$ = (0.746 * HPd / E) * op * c * (\%t1 * f1 + \%t2 * f2 + + \%tn * fn)$$

donde %tn es el porcentaje de tiempo de funcionamiento promedio en un flujo nominal fn (ver figura 16)

$$\$ = (0.746 * 37 / 0.925) * 8760 * 0.035 - (0.746 * 37 / 0.925) * 8760 * 0.035 * (0.25 * 0.16 + 0.1666 * 0.31 + 0.25 * 0.47 + 0.3333 * 0.69)$$

$$\$ = 9148.944 - 9148.944 * (0.04 + 0.05164 - 1 - 0.1175 + 0.229977)$$

$$\$ = 5131.48 \text{ dólares al año}$$

Si realizamos la diferencia entre los dos sistemas obtenemos un ahorro de: dif. \$ = \$1-\$2 = 7044.6868 - 5131.48

$$\text{dif. \$} = 1913.2 \text{ dólares de ahorro al año}$$

Esto nos da un % de ahorro de energía al año de: 27.16

c) Fácil ajuste de la velocidad del motor para compensar variaciones en la demanda.

La facilidad de obtener acceso al variador de frecuencia por una señal analógica hace que este sistema responda de acuerdo con la variación de la carga en forma continua e inmediata. El tiempo de respuesta solo depende de la inercia del sistema al que está conectado el variador de frecuencia, en sistemas con alta inercia el sistema debe responder más lentamente por seguridad del sistema mecánico.

Mediante un transductor de presión de salida de 0 a 5 Vdc, o a 10Vdc, o 4 - 20 mA colocado a la salida de la tubería de distribución, se controla el flujo de líquido de acuerdo a la demanda solicitada por los usuarios.

d) Disminuye el costo al ser menor la potencia controlada. -

En las siguientes dos figuras se puede describir como la velocidad variable puede ahorrar energía al ser el caballaje consumido menor en varias circunstancias de operación.

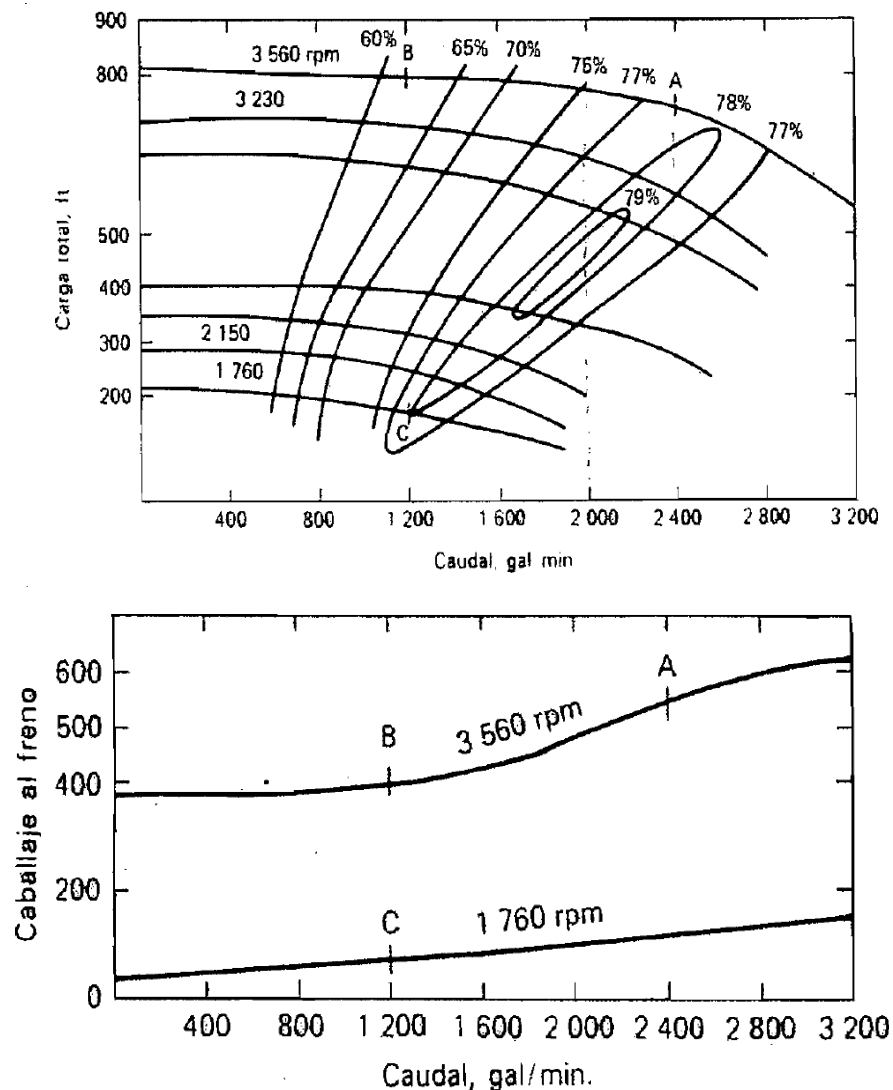


Figura 17: Curvas de ahorro de energía en el caballaje.

En el punto de funcionamiento de diseño de 2400 gal/min a 3560 RPM (punto A de la figura

1) la eficiencia de la bomba es de 77.5 % y el caballaje al freno requerido es de 550 HP (punto A fig. 2) al cambiar el caudal a 1200 gal/min sin cambiar la velocidad de la bomba se requerirían 400 HP (punto B fig. 2) y una eficiencia del 63% (punto fig-1).

Sin embargo, si se altera la velocidad de la bomba para obtener esa reducción en el caudal solo se necesitan 70 HP (punto C) y la eficiencia es del 70% (punto C de la fig. 34). Por tanto, la unidad motriz de velocidad variable permite un ahorro de 330 HP sin pérdida de eficiencia de la bomba.

e) Distribución directa.

En sistemas de distribución de agua con control por detectores de nivel es necesario construir un reservorio de agua a cierta altura para obtener la presión necesaria, a partir del cual se distribuirá agua a los usuarios con la diferencia de presión obtenida entre los dos niveles de los detectores. Los sistemas de variación de velocidad, esta presión puede ser controlada directamente a la salida de las bombas de distribución, lo cual evita construir un reservorio elevado de distribución.

2.2. Automatización industrial

La Automatización Industrial es la aplicación de diferentes tecnologías para controlar y monitorear un proceso, máquina, aparato o dispositivo que por lo regular cumple funciones o tareas repetitivas, haciendo que opere automáticamente, reduciendo al mínimo la intervención humana.

Lo que se busca con la Automatización industrial es generar la mayor cantidad de producto, en el menor tiempo posible, con el fin de reducir los costos y garantizar una uniformidad en la calidad.

La Automatización Industrial la encontramos en muchos sectores de la industria, como en la Fabricación de Alimentos, Productos Farmacéuticos, Productos Químicos, en la Industria Gráfica, Petrolera, Automotriz, Plásticos, Telecomunicaciones entre otros, sectores en los cuales generan grandes beneficios. No solo se aplica a máquinas o fabricación de productos, también se aplica la gestión de procesos, de servicios, a manejo de la información, a mejorar cualquier proceso que con lleven a un desempeño más eficiente, desde la instalación, mantenimiento, diseño, contratación e incluso la comercialización. (Crespo, 2011)

2.3. Sistemas de Control

Recordemos que los automatismos y los robots son capaces de iniciar y detener procesos sin la intervención manual del usuario. Para ello necesitarán recibir información del exterior, procesarla y emitir una respuesta; en un automatismo dicha respuesta será siempre la misma, pero en un robot podemos tener diferentes comportamientos según las circunstancias. A esto se le llama un sistema de control.

A la información que recibe el sistema del exterior se le denomina de forma genérica entrada o input. A las condiciones que existen en el exterior después de la actuación (o no actuación) del robot se les denomina de forma genérica salida u output.

Existen dos tipos de sistemas de control de un robot: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

Asociado al control aparecen tres tipos de variables que es necesario conocer para controlar los procesos:

- Variable controlada (CV): Es la característica de calidad o cantidad que se mide y controla. La variable controlada es una condición o característica del medio controlado, entendiendo por tal la materia o energía sobre la cual se encuentra situada esta variable. Por ejemplo, cuando se controla automáticamente la temperatura del agua de un intercambiador de calor, la variable controlada es la temperatura mientras que el agua es el medio controlado.
- Variable manipulada (MV): Es la cantidad o condición de materia o energía que se modifica por el controlador automático para que el valor de la variable controlada resulte afectado en la proporción debida. La variable manipulada es una condición o característica de la materia o energía que entra al proceso. Por ejemplo, en un intercambiador de calor cuando el elemento final de control modifica el caudal de vapor al proceso, la variable manipulada es el caudal mientras que el vapor es la energía de entrada.
- Variable de perturbación (DV): Es toda variable que tiene influencia sobre la variable controlada pero no puede ser modificada directamente por la variable manipulada. Por ejemplo, la temperatura de entrada de agua en un intercambiador de calor. El sistema tiene que esperar a que el cambio en la temperatura del agua alcance la salida del proceso, donde se encuentra situada la variable controlada, para que ésta realice la acción correspondiente sobre la variable manipulada.

En la actualidad y gracias al avance de la tecnología, se han desarrollado sistemas de control digitales con los cuales se logra un funcionamiento óptimo de los procesos industriales. (Sánchez, 2003)

2.3.1.Elementos en un sistema de control

En todo sistema de control aparecen claramente diferenciados una serie de elementos característicos al mismo que es necesario clarificar:

- **Variable por controlar.** Generalmente se le conoce como señal de salida. Constituye la señal que deseamos que adquiera unos valores determinados. En el ejemplo anteriormente descrito la señal de salida o variable a controlar sería la temperatura ambiente de la vivienda o de una habitación determinada.
- **Planta o Sistema.** La planta o sistema constituye el conjunto de elementos que realizan una determinada función. En el ejemplo propuesto la planta o sistema lo constituiría toda la vivienda en su conjunto. El sistema estaría determinado por las relaciones de transmisión de calor en la misma con las aportaciones y fugas que presentase en función de sus características.
- **Sensor.** El sensor es el elemento que permite captar el valor de la variable a controlar en determinados instantes de tiempo. En el caso propuesto consistiría en el elemento que permitiría conocer la temperatura de la vivienda en determinados momentos.
- **Señal de referencia.** Es la señal consigna o valor que deseamos que adquiera la señal de salida (objetivo de control). En el ejemplo indicaría la temperatura que deseamos que tenga la vivienda a lo largo de toda la jornada.
- **Actuador.** El actuador es el elemento que actúa sobre el sistema modificando de esta forma la señal de salida. En el caso de un sistema de calefacción consistiría en la caldera que permite aportar mayor o menor cantidad de calor sobre el sistema o planta (vivienda) a regular.
- **Controlador.** El controlador o regulador es el elemento que comanda al actuador en función del objetivo de control. En el ejemplo planteado anteriormente, el regulador tendría como misión decidir cuál debe ser la aportación de la caldera en todo instante para mantener el objetivo de control (temperatura de la vivienda). (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.3.2.Sistema de Control de Lazo Abierto

Un sistema de control en lazo abierto es aquel en el que la señal de salida no influye sobre la acción de control. De esta forma el controlador o regulador no tiene en cuenta el valor de la señal de salida, ni se compara ésta con la señal de referencia para decidir la actuación en todo

instante sobre el sistema. El caso más típico de un sistema de control en lazo abierto lo constituye la lavadora eléctrica donde el sistema de control va modificando el tiempo, la temperatura de lavado, etc. en función de la indicación del usuario y no en función del nivel de lavado de la ropa (que constituiría el objetivo de control). De esta forma el usuario decide el programa que desea realizar (señal de referencia), y el controlador actúa sobre los diferentes mecanismos del sistema (lavadora) de forma que realiza una serie de actuaciones sin tener en cuenta la señal de salida. En la figura 1 se pueden observar las señales involucradas en un control en lazo abierto.

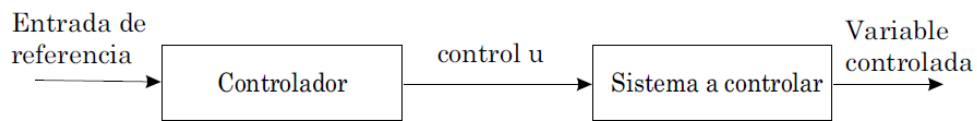


Figura 18: Sistema de Control de lazo abierto.

Evidentemente los sistemas de control en bucle abierto funcionarían razonablemente bien siempre y cuando hayan sido perfectamente estudiados y no exista ninguna alteración sobre el sistema. Si el fabricante ha estudiado perfectamente cuál debe ser el proceso de lavado para la ropa de unas características determinadas y no se altera en modo alguno el proceso, el objetivo final quedará perfectamente alcanzado. Sin embargo, en el momento en que se altere alguna de las características del proceso (cantidad de ropa, temperatura del agua, suciedad de la ropa, etc.) por cualquier motivo, el objetivo de control puede no satisfacerse. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.3.3. Sistema de Control de Lazo Cerrado

En los sistemas de control en bucle cerrado existe una realimentación de la señal de salida o variable a controlar. En este tipo de sistemas se compara la variable a controlar con la señal de referencia de forma que en función de esta diferencia entre una y otra, el controlador modifica la acción de control sobre los actuadores de la planta o sistema. En la figura 2 aparece representado un esquema típico de un sistema controlado en lazo cerrado.



Figura 19: Sistema de control en lazo cerrado.

En el sistema de control en bucle cerrado ya no afecta tanto las variaciones en cada una de las características del proceso (cantidad de ropa, temperatura, etc.) ya que el controlador debe actuar en todo instante en función de la diferencia entre la señal a controlar (limpieza de la ropa) y la señal de referencia (por ejemplo, blancura deseada).

Es necesario comentar que si se conociese perfectamente un sistema y no pudiese alterarse de ninguna forma las características de este (tanto internas como externas), es más aconsejable utilizar un sistema de control en lazo abierto pues serían más sencillos y económicos. Los sistemas de control en lazo cerrado presentan ventajas cuando se pueden producir perturbaciones sobre el sistema o bien variaciones impredecibles en alguna de las características del mismo. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.4. Módulos didácticos para el control de procesos industriales

Un módulo didáctico para el control de procesos industriales es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto para obtener información sobre un determinado proceso, que permita determinar si este es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.

Un módulo didáctico debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, etc., de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores distintos de las variables de proceso y poder determinar así los valores óptimos.

Los módulos didácticos pueden combinarse y agregar nuevas variables a medir, ya que pueden emular un proceso industrial el cual involucra diferentes sistemas dependiendo del proceso.

El desarrollo de un módulo didáctico está relacionado con una propuesta de enseñanza orientada al desarrollo de competencias. Donde competencia se puede definir como la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales.

2.4.1. Tipos de módulos didácticos de control

Un módulo didáctico permite el estudio del control de procesos continuos, soliendo ser las variables típicas por medir: presión, temperatura, humedad, flujo, nivel, etc. El módulo es fabricado con componentes industriales y comerciales reales, fácilmente identificados por los estudiantes y comúnmente utilizados en plantas industriales.

Las principales áreas que se tratan de refinar mediante la experimentación son relativas a producto, materias primas, reacciones, separación y sistemas auxiliares.

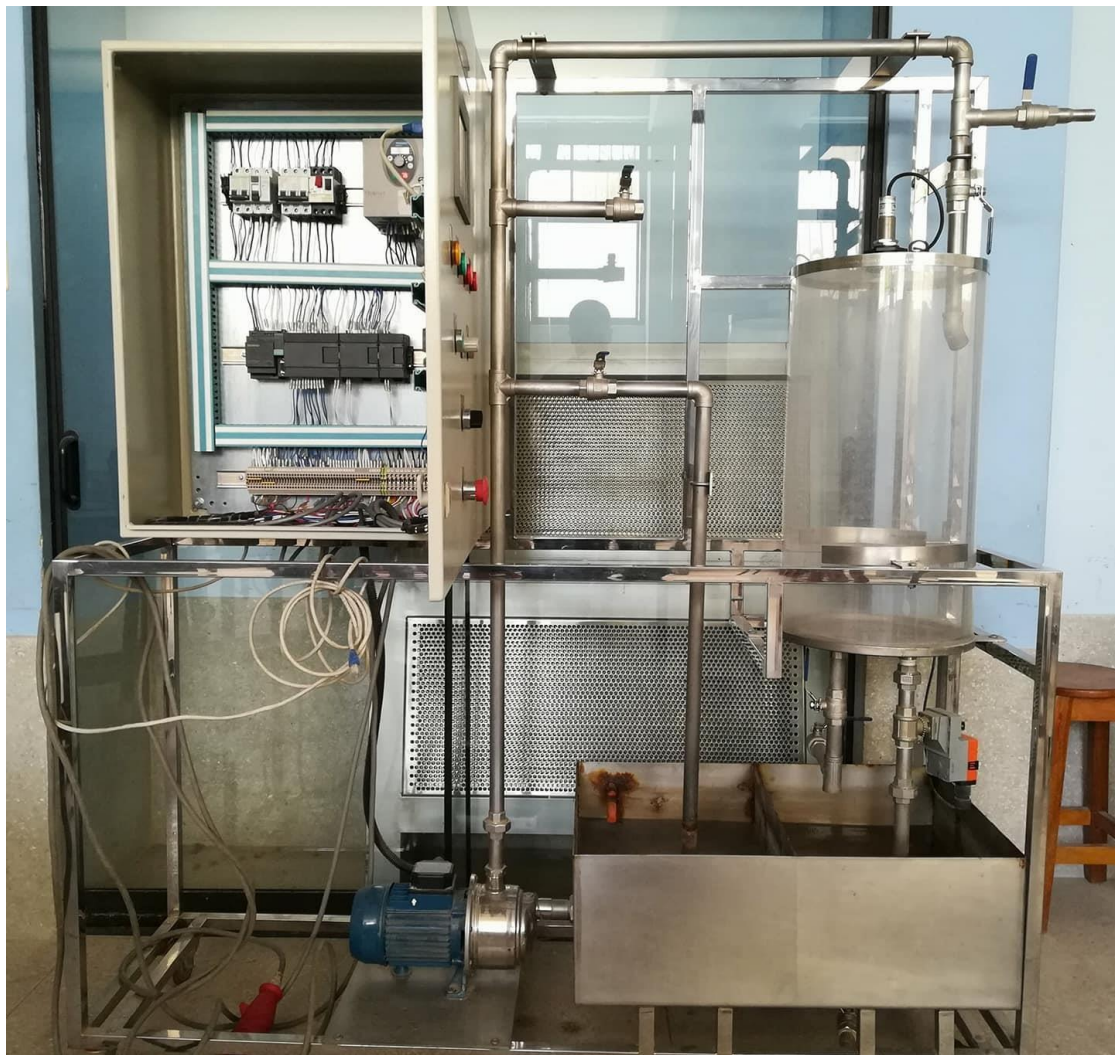


Figura 20: Ejemplo de un Módulo Didáctico de Control.

2.4.2. Módulo didáctico para el control de presión

Dentro de los procesos industriales la medición y el control de la variable presión se hacen indispensables para lograr obtener una producción continua y contar con

condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería tiene una presión máxima de operación y sobrepasarla puede ocasionar la destrucción no solo del mismo equipo sino también la del adyacente y poner al personal en una situación de riesgo, principalmente cuando están implícitos fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, el control y la medición con gran precisión para la variable presión son tan importantes como la seguridad extrema.

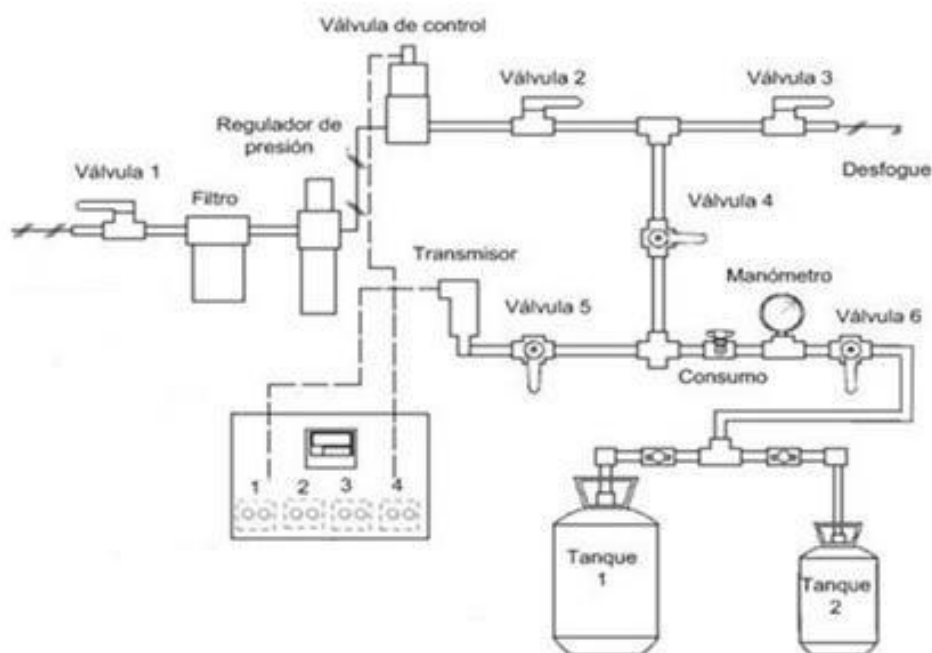


Figura 21: Diagrama Módulo Control de presión.

2.4.3. Módulo didáctico para el control de temperatura

Una La temperatura es una de las principales variables que afectan el curso de los procesos químicos, por tal razón esta variable debe ser medida con la mayor exactitud posible para poder controlarla adecuadamente.

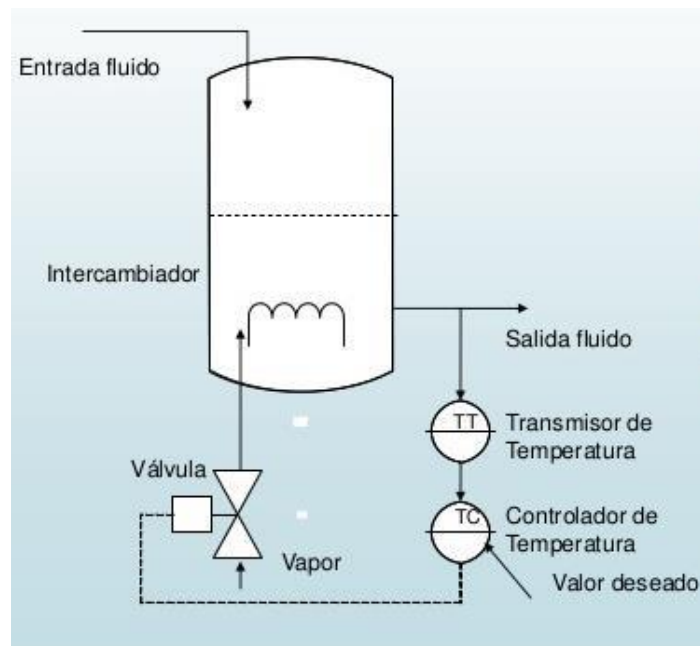


Figura 22: Diagrama Control de Temperatura en un intercambiador de calor.

1.8.1.1. Módulo didáctico para el control de nivel

La medida del nivel de un líquido en un recipiente puede servir para conocer la cantidad de líquido que contiene, así como también como punto de partida de un sistema de control automático adecuado para mantener constante un nivel en un recipiente que haga parte de un proceso continuo.

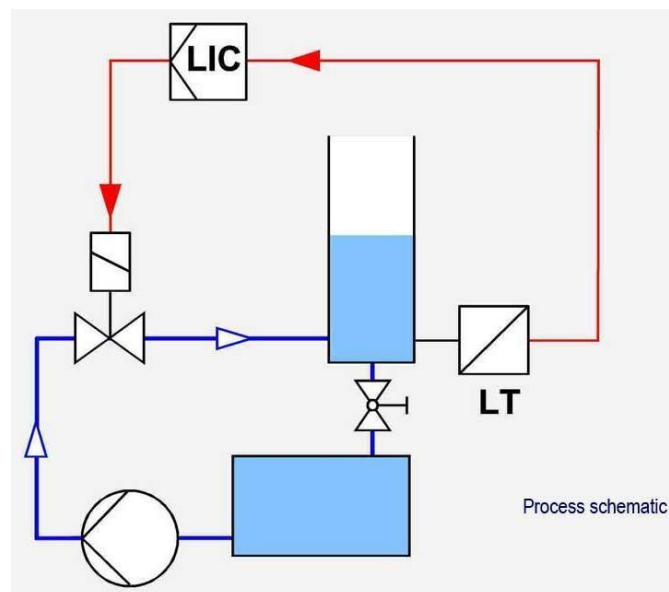


Figura 23: Diagrama Módulo de Control de Nivel de líquido.

2.4.4.Finalidad de un módulo didáctico de control

La función principal de un módulo didáctico es permitir que los estudiantes puedan controlar variables industriales a través de la experimentación y la práctica. Además, permite llevar a cabo la investigación de parámetros que muestren la información sobre la aplicabilidad de este sistema a nivel industrial.

Una vez que se haya concluido el trabajo experimental en el módulo didáctico, se desprenderá la siguiente información:

- El diagrama de bloques del proceso.
- Reconocimiento de las variables de proceso y como pueden afectar al mismo.
- Reconocimiento de las variables de perturbación y sus efectos sobre el proceso.
- Determinación del tipo de control que se debe aplicar al proceso.
- Los materiales de construcción más adecuados para la planta.
- Los costos estimados de construcción y operación de la planta.

2.5. Controladores Lógicos Programables

El controlador lógico programable es un equipo electrónico que se usa frecuentemente en el manejo de procesos industriales.

Fueron introducidos en los años 60 para reemplazar las antiguas lógicas cableadas o lógicas de relé, que eran controles hechos con diferentes tipos de relé (como relé de uso general o temporizadores), de hecho la primeras instrucciones diseñadas para el controlador lógico programable emulaban las funciones de los relés y eran dispuestos en un lenguaje gráfico llamado escalera por su similitud con una escalera como las usadas por los bomberos, muy similar a los diagramas o planos de la lógica de relé.

Los controladores lógicos programables han ido evolucionando con la tecnología, ahora tienen un conjunto de instrucciones que incluyen funciones lógicas, aritméticas, de comparación, manejo de archivos, flujo de programas y lazos PID entre otros. (Miguel, 2015)

2.5.1.Clases de PLC

2.5.1.1. PLC Compacto

Son aquellos PLCs que utilizan poco espacio en su construcción y reúnen en la estructura básica del hardware todas las tarjetas electrónicas que describimos anteriormente, tal como la fuente de alimentación, la CPU, la memoria y las interfases de E/S.

Las principales ventajas que presentan estos PLC compactos, denominados así por su tamaño, son:

- Más económicos dentro de su variedad.
 - Menor espacio por su construcción compacta.
 - Su programación es bastante sencilla.
 - No requiere conocimientos profundos para su selección.
 - Fácil instalación.
 - Soportan contingencias extremas de funcionamiento tales como, temperaturas <60°C, fluctuaciones de tensión, vibraciones mecánicas, humedad, etc.
- (Villajulca, 2012)



Figura 24: PLC compacto S7-1200.

2.5.1.2. PLC Modular

Son aquellos PLCs que pueden ser configurados (armados) de acuerdo con las necesidades, para “armar” al PLC utilizamos las tarjetas (o módulos) electrónicos estudiados anteriormente, logrando mayor flexibilidad.

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.

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. (Villajulca, 2012)



Figura 25: PLC Modular Allen Bradley.

2.5.1.3. PLC Compacto- Modular

Una configuración compacto-modular está constituida, básicamente, por un PLC del tipo compacto, que se ha expandido a través de otros módulos, por lo general, entradas y salidas discretas o analógicas, módulos inteligentes, etc. El uso de las expansiones se debe a que la unidad básica que contiene la CPU generalmente está diseñada con pocas E/S, y cuando la aplicación a automatizar contiene muchos sensores y actuadores, es necesario ampliar el controlador, utilizando solamente módulos de E/S gobernados por la misma unidad básica. Esta configuración destaca por las siguientes características:

- Son más económicos que los PLC de tipo modular.
- La selección es sencilla ya que la CPU está seleccionada.
- Soportan contingencias extremas de funcionamiento.
- Su programación es fácil, donde solamente se debe tener en cuenta el direccionamiento de las instrucciones, según la unidad de extensión a la que se refiere. (Villajulca, 2012)



Figura 26: PLC Compacto – Modular.

2.6. Variador de velocidad (ABB, s.f.)

El variador de frecuencia es la solución eficaz para mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono. En esta página hablaremos de las características, las ventajas y el funcionamiento de los variadores de frecuencia.

Los motores eléctricos juegan un papel muy importante en nuestros negocios y vidas ya que controlan básicamente todo lo que necesitamos para nuestro trabajo y actividades de ocio. Todos estos motores funcionan con electricidad y necesitan una cantidad determinada de energía eléctrica para poder realizar su trabajo de proporcionar par y velocidad. La velocidad de un motor debería coincidir exactamente con la que exige el proceso en cuestión, y usar solo la energía necesaria.

El variador de frecuencia regula la velocidad de motores eléctricos para que la electricidad que llega al motor se ajuste a la demanda real de la aplicación, reduciendo el consumo energético del motor entre un 20 y un 70%.

Un variador de frecuencia por definición es un regulador industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor. La energía de la red pasa por el variador y regula la energía antes de que ésta llegue al motor para luego ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento.

Los variadores reducen la potencia de salida de una aplicación, como una bomba o un ventilador, mediante el control de la velocidad del motor, garantizando que no funcione a una velocidad superior a la necesaria.

El uso de variadores de frecuencia para el control inteligente de los motores tiene muchas ventajas financieras, operativas y medioambientales ya que supone una mejora de la productividad, incrementa la eficiencia energética y a la vez alarga la vida útil de los equipos,

previniendo el deterioro y evitando paradas inesperadas que provocan tiempos de improductividad.

El variador de frecuencia también es conocido como convertidor de frecuencia de corriente alterna, convertidor de velocidad variable, variador de velocidad, VSD, VFC o VFD por sus siglas en inglés o simplemente variador o convertidor. A menudo hay confusiones sobre la diferencia entre variador de velocidad y variador de frecuencia o convertidor de frecuencia. Si tomamos como referencia las siglas más ampliamente usadas a nivel internacional (“VFD” del inglés “Variable Frequency Drive”), y lo traducimos literalmente, nos conduciría a “Accionamiento de Frecuencia Variable”. Sin embargo, los términos más utilizados actualmente en nuestro país son convertidor de frecuencia y variador de frecuencia.

Los variadores funcionan mediante la conversión de alimentación de CA de frecuencia fija en frecuencia variable, variable de tensión de alimentación de CA.

a) Convertir CA entrante en CC.

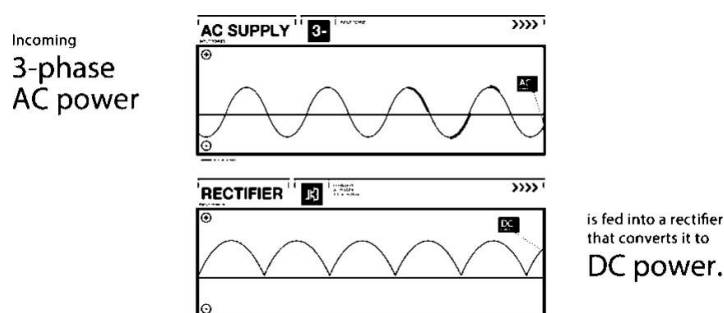


Figura 27: Convertir CA entrante en CC.

b) Suavizar la onda DC

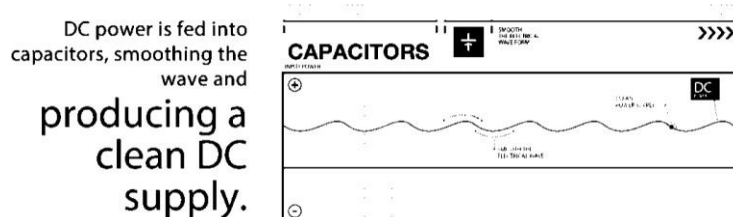


Figura 28: Suavizar la onda DC.

c) Convertir la CC a la variable de CA

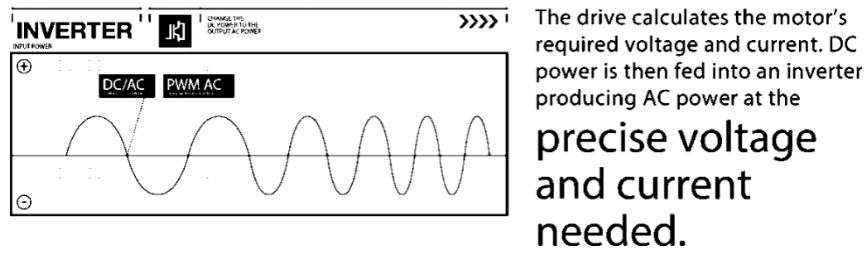


Figura 29: Convertir la CC a la variable de CA.

d) Calcular y repetir

The drive continuously calculates and adjusts the frequency and voltage providing only the power (speed and torque) the motor needs. This is how you can **Save** large amounts of energy.

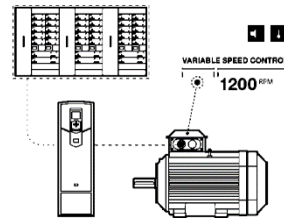


Figura 30: Calcular y repetir.

2.7. Instrumentos Industriales

2.7.1.1. Sensores

2.7.1.2. Sensores de Presión

El sensor de presión más común es el tubo de Bourdon, desarrollado por el ingeniero francés Eugene Bourdon, y el cual se ilustra en la figura 31; consiste básicamente en un tramo de tubo en forma de herradura, con un extremo sellado y el otro conectado a la fuente de presión. Debido a que la sección transversal del tubo es elíptica o plana, al aplicar una presión el tubo tiende a enderezarse, y al quitarla, el tubo retorna a su forma original, siempre y cuando no se rebase el límite de elasticidad del material del tubo. La cantidad de enderezamiento que sufre el tubo es proporcional a la presión que se aplica, y como el extremo abierto del tubo esta fija, entonces el extremo cerrado se puede conectar a un indicador, para señalar la presión; o a un transmisor, para generar una señal neumática o eléctrica.

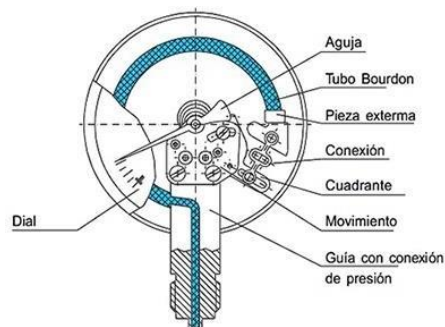


Figura 31: Tubo de Bourdon sencillo.

El rango de presión que se puede medir con el tubo de Bourdon depende del espesor de las paredes y del material con que se fabrica el tubo. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

2.7.1.3. Sensores de Flujo

El flujo es una de las dos variables de proceso que se miden más frecuentemente, la otra es la temperatura; en consecuencia, se han desarrollado muchos tipos de sensores de flujo.

Probablemente el sensor de flujo más popular es el medidor de orificio, que es un disco plano con un agujero. El disco se inserta en la línea de proceso, perpendicular al movimiento del fluido, con objeto de producir una caída de presión, la cual es proporcional a la razón de flujo volumétrico a través del orificio.

Otro tipo común de sensor es el medidor magnético de flujo que se ilustra en la figura 32. El principio de operación de este elemento es la ley de Faraday; es decir, cuando un material conductor (un fluido) se mueve en ángulo recto a través de un campo magnético, se induce un voltaje, el cual es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la velocidad del fluido. Si la intensidad del campo magnético es constante, entonces el voltaje únicamente es proporcional a la velocidad del fluido; además, la velocidad que se mide es la velocidad promedio y, por lo tanto, este sensor se puede utilizar para los dos regímenes: laminar y turbulento. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

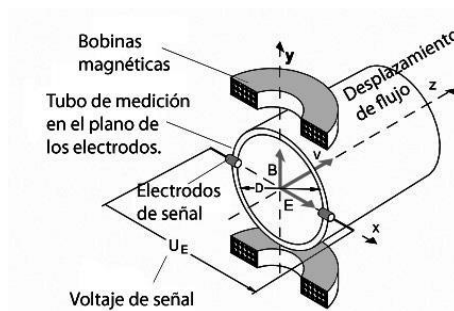


Figura 32: Medidor magnético de flujo.

Otro medidor de flujo importante es el medidor de turbina que se ilustra en la figura 10. Es uno de los más precisos de que se dispone comercialmente. Su principio de funcionamiento se basa en un rotor que se hace girar con el flujo del líquido; la rotación

de las aspas se detecta mediante una bobina de colección magnética, la cual emite pulsos a una frecuencia que es proporcional a la razón de flujo volumétrico; este pulso se convierte en una señal equivalente de 4-20 mA, de manera que se pueda utilizar con instrumentación electrónica estándar, el convertidor o transductor es generalmente parte integral del medidor. Uno de los problemas que más comúnmente se asocia con los medidores de turbina es el de los cojinetes (rodamientos), por lo que se requiere que los líquidos sean limpios y con algunas propiedades lubricantes. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

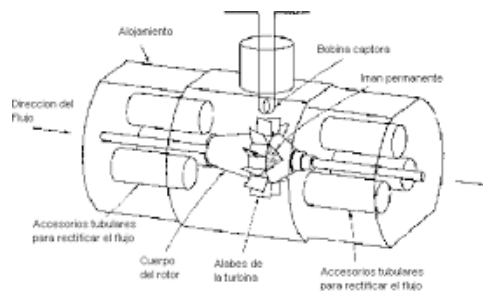


Figura 33: Medidor de flujo de turbina.

2.7.1.4. Sensores de Nivel

Los tres medidores de nivel más importantes son el de diferencial de presión, el de flotador y el de burbujeo. El método de diferencial de presión consiste en detectar la diferencia de presión entre la presión en el fondo del líquido y en la parte superior del líquido, la cual es ocasionada por el peso que origina el nivel del líquido. Este sensor se ilustra en la figura 34. El extremo con que se detecta la presión en el fondo del líquido se conoce como extremo de alta presión, y el que se utiliza para detectar la presión en la parte superior del líquido, como extremo de baja presión. Una vez que se conoce el diferencial de presión y la densidad del líquido, se puede obtener el nivel.

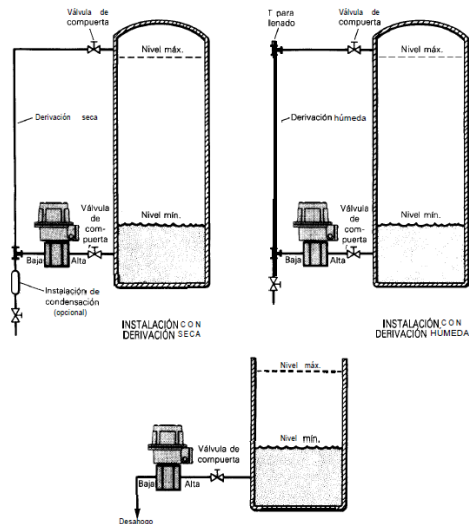


Figura 34 : Instalación de transmisores de presión diferencial en recipientes abiertos y cerrados.

Con el Sensor de flotador se detecta el cambio en la fuerza de empuje sobre un cuerpo sumergido en el líquido. Este sensor se instala generalmente en un ensamble que se monta de manera externa al recipiente, como se muestra en la figura 35. La fuerza que se requiere para mantener al flotador en su lugar es proporcional al nivel del líquido y se convierte en una señal en el transmisor.

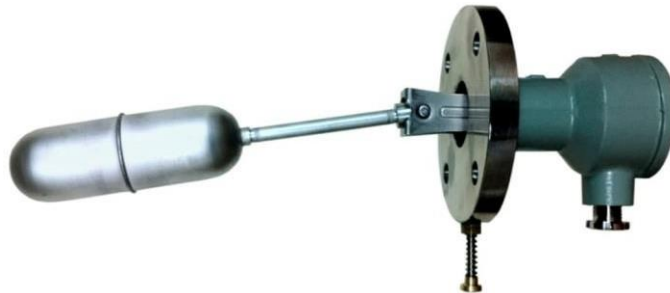


Figura 35: Sensor de nivel con flotador.

El sensor de burbujeo es otro tipo de sensor de presión hidrostática, y consiste, como se muestra en la figura 36, en un tubo con gas inerte que se sumerge en el líquido; el aire o gas inerte que fluye a través del tubo se regula para producir una corriente continua de burbujas, y la presión que se requiere para producir esta corriente continua es una medida de la presión hidrostática o nivel del líquido.

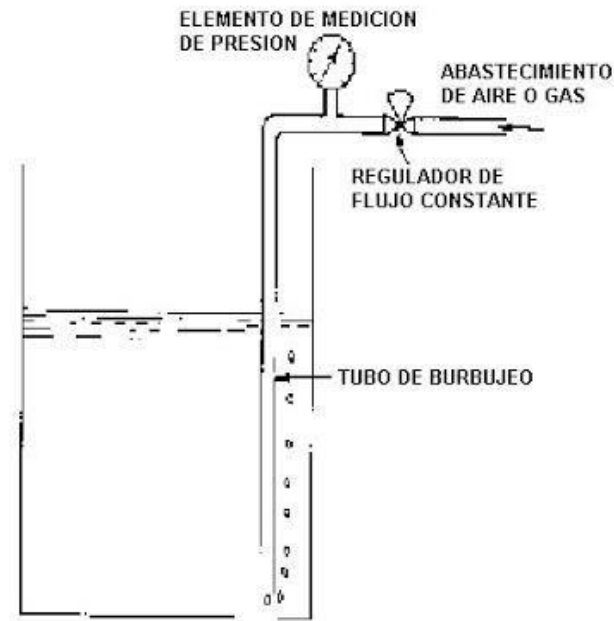


Figura 36: Sensor de nivel de burbujas de aire.

Existen otros métodos nuevos para medir el nivel en los tanques, algunos de éstos son patrones de capacitancia, sistemas ultrasónicos y sistemas de radiación nuclear; los dos últimos sensores también se utilizan para medir el nivel en materiales sólidos. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

2.7.1.5. Sensores de Temperatura

La temperatura, junto con el flujo, es la variable que con mayor frecuencia se mide en la industria de proceso; una razón simple es que casi todos los fenómenos físicos se ven afectados por esta. La temperatura se utiliza frecuentemente para inferir otras variables del proceso.

Los termómetros de dispositivos resistivos (TDR) son elementos que se basan en el principio de que la resistencia eléctrica de los metales puros se incrementa con la temperatura y, ya que la resistencia eléctrica se puede medir con bastante precisión, esto proporciona un medio para medir la temperatura con mucha exactitud. Los metales que se utilizan más comúnmente son platino, níquel, tungsteno y cobre. En la figura 37 se muestra el esquema de un TDR típico.

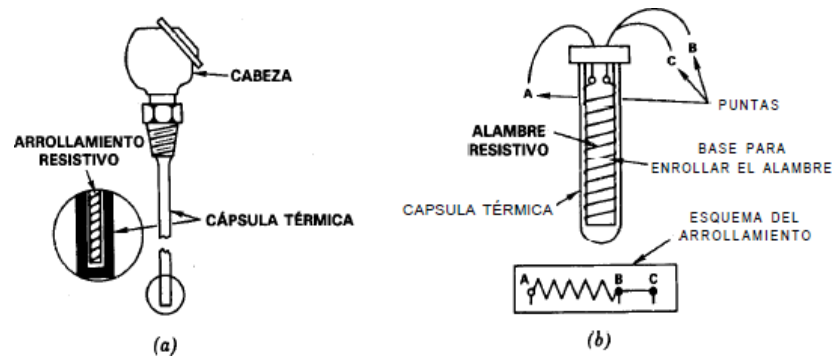


Figura 37: Esquema de un termómetro de resistencia. a) Ensamblaje, b) Componentes.

Para la lectura de la resistencia y, en consecuencia, también para la de temperatura generalmente se utiliza un puente de Wheatstone. En la figura 38 se ilustra el sistema de los puentes de dos y tres hilos que se utilizan.

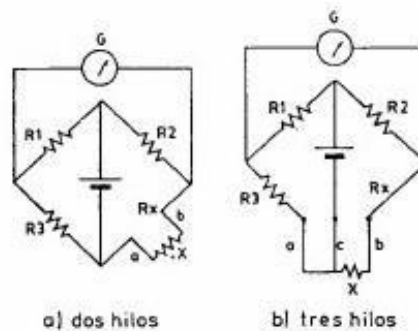


Figura 38: Puente de Wheatstone de dos hilos y de tres hilos. Con los elementos termistores se detectan cambios muy leves de temperatura. Los termistores se fabrican con la combinación sinterizada de material cerámico y alguna clase de óxido metálico semiconductor, como níquel, manganeso, cobre, titanio o hierro.

En los termistores se tiene un coeficiente de resistividad térmica muy negativo, o algunas veces positivo. En la figura 39 se ilustran algunos termistores típicos. Los puentes de Wheatstone de la figura 38 se utilizan generalmente para medir la resistencia y, por lo tanto, también la temperatura. Algunas de las ventajas son el tamaño pequeño y el bajo costo; sus principales desventajas estriban en que la relación de la temperatura contra la resistencia no es lineal, así como el hecho de que generalmente se requieren líneas de fuerza blindadas. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

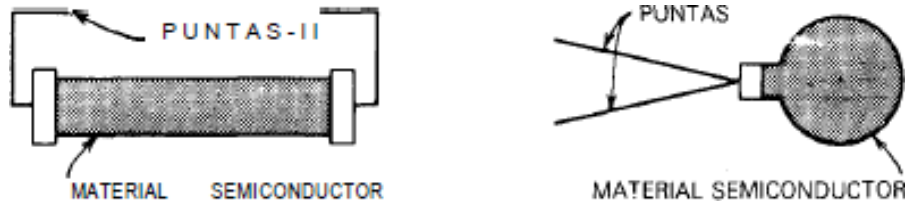


Figura 39: Construcción de un termistor típico.

2.7.1.6. Actuadores

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo de el origen de la fuerza el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico”. (C.)

2.7.1.7. Válvulas de Control

Existen muchos tipos diferentes de válvulas de control en el mercado, casi cada mes se ofrece una “nueva” válvula de control “mejorada”.

2.7.1.7.1. De Vástago Reciproco

Conocidas también como válvulas de globo con asiento sencillo y vástago deslizable. Son una familia de válvulas que se caracterizan por una parte de cierre que viaja en línea perpendicular al asiento de la válvula, y se utilizan principalmente para propósitos de estrangulamiento y control de flujo en general.

Existen también las válvulas de tres vías que son de tipo reciproco. Las válvulas de tres vías pueden ser convergentes o divergentes y, en consecuencia, con ellas se pueden separar una corriente en dos o se pueden mezclar dos corrientes en una sola. Comúnmente se utilizan para propósito de control. (Andrew, 2002)

2.7.1.7.2. De Vástago Rotatorio

Una de las más comunes es la válvula de mariposa, estas válvulas constan de un disco que gira alrededor de un eje; se requiere mínimo espacio para su instalación y se tiene alta capacidad de flujo con caída de presión mínima; se utilizan en servicios de baja presión. Con los discos convencionales se logra controlar el estrangulamiento hasta en 60 grados de giro, pero con discos de nueva patente se puede controlar el estrangulamiento para un giro completo de 90 grados.

Otra válvula común de vástago rotatorio es la válvula de esfera, con ellas también se logra una alta capacidad de control de flujo con caída mínima de presión, se utilizan comúnmente para manejar suspensiones o materiales fibrosos; la tendencia a escurrimiento es baja y su tamaño es pequeño. (Andrew, 2002)

2.7.1.7.3. Motores

Entre los motores de corriente alterna que más se emplean en la industria tenemos a los motores asíncronos, y entre estos tenemos los de rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla, estos son los más utilizados.

Estos motores se diseñan y se construyen de tal forma que, sus bobinados, en carga nominal, resistan unos calentamientos compatibles con una larga vida de sus aislantes. Es preciso recordar que un motor se calienta por efecto de sus pérdidas en el cobre, proporcionales al cuadrado de la intensidad, y de sus pérdidas en el hierro, constantes para una tensión dada. (Andrew, 2002)

DISEÑO DEL SISTEMA

CAPÍTULO III

3.1. Introducción

A continuación, se describirá el funcionamiento de nuestro sistema de control de un sistema de presión constante y la instrumentación necesaria para lograr este control. Además, se ilustrarán: El diagrama de bloques del sistema, se realizará una descripción del software, identificación de Señales de Control y Monitoreo, se detallará el programa del PLC y el panel HMI.

3.2. Descripción del Sistema

En el siguiente proyecto se utilizará para el control de un sistema de presión constante un sensor de presión OsiSense XM, un PLC M340, un HMI MAGELIS STU de la Marca SHNEIDER ELECTRIC los cuales se encargarán de controlar y monitorizar las variables que intervendrán en el proceso.

Las variables por monitorear y controlar son las siguientes:

- Medición de la presión.
- Control manual de las válvulas de salida de agua.

3.3. Descripción física del sistema

El sistema cuenta con un sensor de temperatura y otro de humedad, PLC S7-1200, un módulo de e/s analógicas, un HMI STU 855, dos válvulas proporcionales, un LCB (Local Control Box), entre otros.

Se ha asignado una función específica para cada elemento del LCB (Local Control Box) como muestra la siguiente tabla:

Tabla 1: Descripción Local Box.

Ítem	Elemento	Función	Tipo	Estado
1	Selector de dos posiciones	Local / Automático	DI	1: LOCAL 1: REMOTO
2	Pulsador Verde	Marcha Sistema	DI	NA
3	Pulsador Rojo	Paro Sistema	DI	NC
4	Piloto Verde	Sistema Funcionando	DO	NA
5	Piloto Amarillo	Sistema Alimentado	DO	NA

6	Piloto Rojo	Nivel Alto	DO	NA
7	Piloto Rojo	Nivel Bajo	DO	NA
8	Potenciómetro	Referencia Presión	AI	0-10V

DI: Digital Input DO: Digital Output

NA: Normalmente abierto NC: Normalmente cerrado

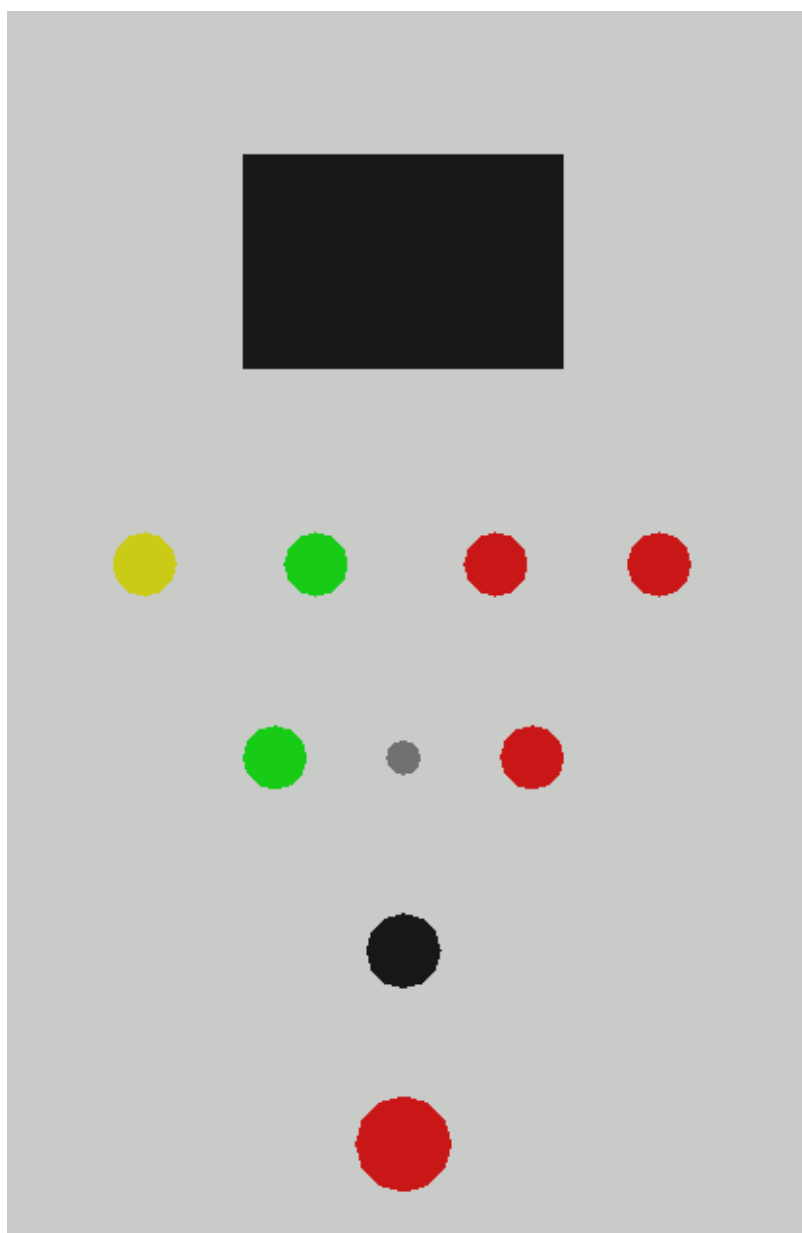


Figura 40: Local Box 3D.

3.4. Funcionamiento del sistema

Si el selector se encuentra en modo LOCAL, los comandos de arranque/parada serán controlados por los pulsadores START (Normalmente Abierto) y STOP (Normalmente Cerrado); por otro lado, la referencia de presión solo podrá ser ingresada desde el POTENCIÓMETRO. Durante la operación normal, será posible cambiar los rangos establecidos. Por otro lado, el usuario no podrá arrancar el motor si no ingresa un rango diferente a 0.

Si el selector se encuentra en modo AUTOMÁTICO, los comandos de arranque/parada y la referencia de presión con un rango de 0 y 10bar serán controlados por el HMI. La comunicación entre el HMI y el PLC M340 será mediante una conexión MODBUS TCP/IP. La botonera STOP (Normalmente Cerrada) funcionará como una Parada de Emergencia, con el fin de detener localmente al motor, en caso, se detectará una anomalía durante la operación. Por otro lado, el usuario no podrá arrancar el motor si no ingresa una referencia de temperatura y humedad diferente a 0.

3.5. Diagrama de bloques del sistema

La siguiente figura muestra el diagrama de bloques del proceso. En ella se puede observar que hay una señal de realimentación obtenida por el sensor – transmisor de presión, la cual es transmitida hacia el PLC para que a través de un algoritmo de control PID para regular la velocidad de la Electrobomba.

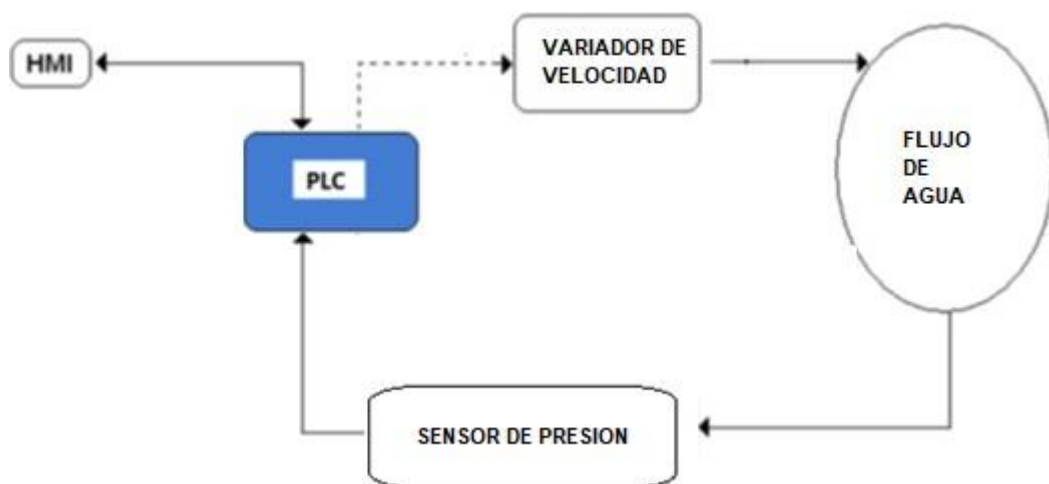


Figura 41: Diagrama de bloques del sistema.

3.1. Diagrama P&ID

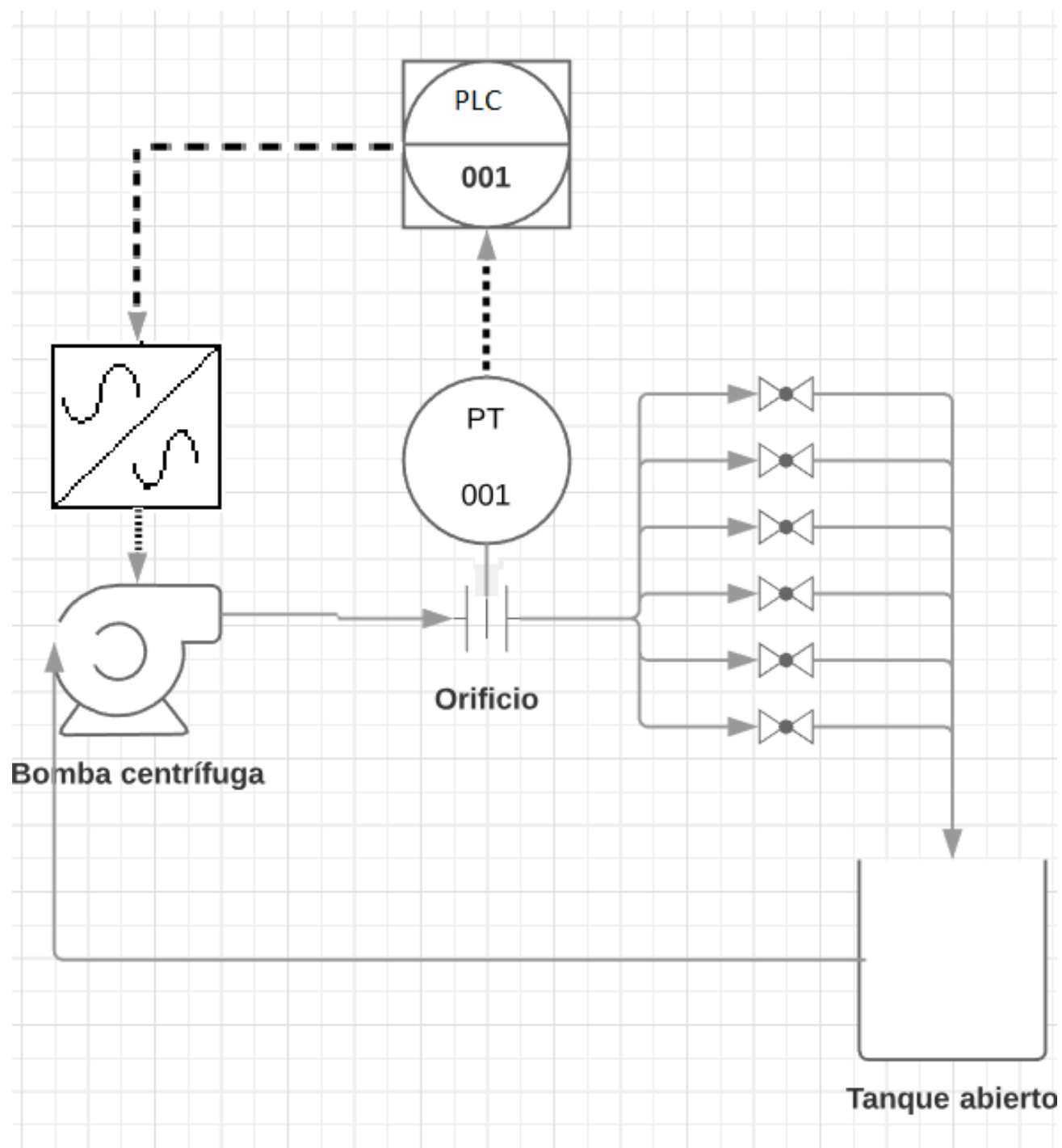


Figura 42: Diagrama P&ID.

3.6. Identificación de Señales de Control y Monitoreo

Tabla 2: Señales de control y monitoreo.

DESCRIPCIÓN	TIPO DE SEÑAL
Selector Local	Discreta
Selector Automático	Discreta
Marcha Sistema	Discreta
Paro Sistema	Discreta
Lampara Sistema Funcionando	Discreta
Lampara Nivel Alto	Discreta
Lampara Nivel Bajo	Discreta
Electrobomba	Discreta
Sensor/Transmisor de Presión	Analógica
Potenciómetro	Analógica

3.7. Selección de Equipos

3.7.1. Especificación de Instrumentación

3.7.1.1. Sensor de Presión XMLK010B2C21 - TELEMECANIQUE



Figura 43: Sensor de Presión OsiSense

3.7.1.1.1. Descripción

Sensor de Presión Electrónico de salida analógica estándar 4-20mA con un rango de 0-25 bar, cuenta con un índice de protección IP65.

3.7.1.1.2. Características y Aplicaciones

- | | |
|------------------------|--|
| • Gama de producto | OsiSense XM |
| • Tipo de presostato | Transmisor de presión |
| • Capacidad de presión | 10 bar |
| • Fluido controlado | Air -30...135 °
Agua dulce 0...135 °C |
| • Clip-en la etiqueta | G 1/4A (Macho) |

- Tensión de alimentación asignada 12-24 V DC
- Límite de Voltaje 7...33 V
- Consumo de corriente < 20 mA
- Tipo de señal de salida Analógico
- Función de salida analógica 4...20 mA, 2 hilos

3.7.1.1.3. Conector XZCC43FCP40B



Figura 44: Conector XZCC43FCP40B.

- Categoría de accesorios / repuestos Accesorios de cableado
- Tipo de accesorio/componente Conector
- Consecutivo, seguido, continuo, adosado Elbowed female
connector DIN 43650 A, 4 pins
- LED de estado Sin
- Conexión de cable Screw terminal / wire size
<= 1.5 mm² / clamping capacity 7...10 mm
- Fijación de conector de cable Tornillo de bloqueo
- Material del envoltente Plástico
- Grado de protección IP65
- Temperatura ambiente de funcionamiento -40 - 125°C

3.7.2.Especificación del Sistema de Control

3.7.2.1. PLC

Para la elección del PLC se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El CPU deberá tener la capacidad de leer todas las entradas, realizar la lógica de control y controlar las salidas a campo.
- El CPU se deberá poder programar en lógica de escalera(Ladder).

De acuerdo con estas consideraciones en el proyecto se utilizó la Unidad Central de procesamiento Modicon BMXP342020.



Figura 45: PLC Modicon BMXP342020.

Datos Técnicos:

- Rango de producto Plataforma autom. Modicon M340
- Número de racks 4
- Número de ranuras 11
- Capacidad del procesador de E/S
Digitales 1024 E/S configuración multibastidor
 704 E/S configuración de 1 bastidor
- Capacidad del procesador E/S analógicas
 256 E/S configuración multibastidor
 66 E/S configuración de 1 bastidor

3.7.2.1.1. Módulo Entradas y Salidas

3.1.1.1.2. Módulo de Entradas y Salidas Analógicas

Para la elección del Módulo de Entradas y Salidas Analógicas se tuvo en cuenta las especificaciones del Sensor de Presión y del Variador de velocidad.

De acuerdo con estas Consideraciones en el proyecto se utilizó el Módulo de entradas analógicas BMXAMM0600.



Figura 46: Módulo de entradas y salidas analógicas BMXAMM0600.

Datos Técnicos:

- Protección del módulo contra sobretensiones
- Conversión de señales digitales (11 bits o 12 bits según la gama) a señales analógicas
- Conversión de datos de aplicación a datos que puede utilizar el convertidor digital/analógico
- Supervisión de módulo e indicación de fallos de la aplicación: prueba de convertidor, prueba de sobre disparo de gama, prueba de vigilancia
- Para cada entrada, el módulo BMX AMM 0600 ofrece los intervalos siguientes:
- Tensión: $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, 0 a 10 V, 0 a 5 V y 1 a 5 V
- Corriente: 0...20 mA, 4...20 mA y $\pm 20\text{ mA}$, en función de la elección realizada durante la configuración

3.7.2.1.2. Módulo de Entradas y Salidas Digitales

Para la elección del Módulo de Entradas y Salidas digitales se tuvo en cuenta el número de entradas y salidas digitales a usar en el sistema.

De acuerdo con estas Consideraciones en el proyecto se utilizó el Módulo de entradas analógicas BMXDDM3202K.



Figura 47: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K.

Datos Técnicos:

- | | |
|-------------------------------|---|
| • Gama de producto | Plataforma de automatización Modicon M340 |
| • Producto o componente tipo | Módulo de E / S discreto |
| • Conexión eléctrica | Conector de 20 vías |
| • Entrada discreta número | 16 |
| • Tipo de entrada | Disipador de corriente |
| • Tensión de entrada discreta | 24 V DC positiva |
| • Número de salida discreta | 16 |
| • Tipo de salida discreta | Estado sólido |
| • Tensión de salida discreta | 24 V 19 - 30 V DC |

3.7.2.1.3. Variador de Frecuencia

3.1.1.1.3. Variador de Frecuencia ACS310-03E-04A5-4.

Para poder seleccionar un variador de frecuencia hay que tener en cuenta el tipo de carga que estará a su disposición, la potencia de dicha carga y el tipo de alimentación. En este caso la carga son electrobombas centrífugas trifásicas que son cargas de par variable.

Por lo tanto, se seleccionará un variador de velocidad que sea adecuado para trabajar con electrobombas centrífugas de una determinada potencia y que su alimentación sea trifásica a una tensión de 380V.

Funciones de bomba y ventilador como control de la bomba y el ventilador (PFC) y SPFC para el arranque suave de la bomba.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se propone utilizar el Variador de Frecuencia ACS310-03E-04A5-4.



Figura 48: Variador de Frecuencia ACS310-03E-04A5-4.

Datos Técnicos:

- Potencia Nominal 1,5 kW
- Fase 2
- Tensión de Alimentación 380 → 480 V
- Corriente Nominal 4,5 A
- Frecuencia de Salida 0 → 500Hz
- Temperatura Ambiental -10 → +50°C
- Tipo de Comunicación Field Bus ModBus
- Índice de Protección IP IP20

3.7.2.1.4. Panel de control ABB ACS-CP-C

Panel de Control utilizado para configurar los parámetros básicos de nuestro variador de frecuencia.



Figura 49: Panel de Control Básico ACS-CP-C.

Datos Técnicos:

- Tipo de Accesorio Panel del operario
- Para Uso con Serie ACS310, Serie ACS350, Serie ACS355, Serie ACS510, Serie ACS550

3.7.3. Especificación del Sistema de Bombeo

3.7.3.1. Electrobomba

Para la elección de la Electrobomba se propone utilizar el modelo CST 150/2 de la marca Pentax.



Figura 50: Electrobomba Pentax CST 150/2.

Datos Técnicos:

- Modelo: CST 150/2
- Fabricado en: Italia
- Voltaje: 380V
- Capacidad: 1,1 KW
- Qmax: 48 m³/h
- Hmax: 12m
- Manguera de succión: 2"
- Garganta: 2"
- Protección: IP44 (S.A.C, 2017)

3.7.3.2. Interfaz Hombre Maquina

3.1.1.1.4. HMI

Se propone utilizar el HMI HMISTU855 dado su tamaño, gama de 65536 colores, se puede operar a través del teclado o pantalla táctil.



Figura 51: HMISTU855.

Datos Técnicos:

• Diseño	HMISTU855
• Tamaño de Pantalla	5.7''
• Interfaz	RJ45, USB
• Protocolos	Modbus, Modbus TCP/IP
• Tensión de Alimentación	24VDC
• Límite de Alimentación	20.4 V a 28.8 V DC
• Operación temperatura	Min. 0 °C
• Operación temperatura	Max. 50 °C
• Índice de Protección IP	IP65
• Software de configuración	Vijeo Designer

3.8. Especificaciones del Software de Programación del PLC

3.8.1. Unity Pro

Características

Unity Pro es el software de programación, depuración y operación común para las gamas Modicon Premium, Atrium y Quantum PLC. Con sus cinco lenguajes IEC61131-3, todas las herramientas de depuración y diagnóstico, Unity Pro está hecho para aumentar su productividad de desarrollo y la facilidad de mantenimiento. Con Unity Pro, su inversión de software se optimiza, los costos de capacitación se reducen y aprovecha un potencial de desarrollo inigualable.

Beneficios

Aumente su productividad con una conciencia superior

Unity Pro es tan creativo que crea sus normas de aplicación, lo que facilita la reutilización en diferentes aplicaciones y aumenta la productividad y la calidad.

Unity Pro se construye sobre estándares de software de apertura y abre las puertas a una colaboración rápida y fácil con otras herramientas de software del proyecto.

Aplicaciones

- Control de fabricación
- Control de procesos por lotes
- Infraestructura



Figura 52: Logo Unity Pro XL.

3.9. Especificaciones del Software de Programación del HMI

3.9.1. Vijeo Designer

Vijeo Designer es una aplicación de software de última generación con la que el usuario puede crear paneles de operadores y configurar parámetros operativos para dispositivos de la interfaz usuario-máquina (HMI). Este programa proporciona todas las herramientas necesarias para el diseño de un proyecto HMI, desde la adquisición de datos hasta la creación y la visualización de sinopsis animadas.

Requisitos Mínimos del sistema

- Procesador Intel Celeron 566 MHz o superior (se recomienda Pentium III 1GHz o superior)
- Memoria 128 MB de RAM (se recomiendan 512 MB o más)
- Espacio en disco disponible 400 MB o más en el disco duro
- Sistema operativo Windows 2000 o XP (inglés, francés, alemán, italiano o español)
- Navegador Web Internet Explorer 5.0 o una versión más reciente

Funciones

- Reutilización de los datos
- Vijeo Designer utiliza dos tipos de datos:
 - los datos internos creados en la aplicación del usuario
 - los datos suministrados por dispositivos externos, como los autómatas y módulos de E/S remotos

Conectividad con varios autómatas

- Gracias a Vijeo Designer el usuario puede configurar un panel HMI con vistas a comunicarse de forma simultánea con varios dispositivos Telemecanique diferentes y con dispositivos de otros fabricantes.

Creación de pantallas HMI

- Vijeo Designer le permite crear pantallas dinámicas para el panel HMI. Combina diferentes funciones en una aplicación sencilla, como objetos en movimiento, niveles de zoom, indicadores de nivel, indicadores de inicio/parada y conmutadores. La utilización de símbolos animados puede emplearse para crear y editar una pantalla gráfica de forma sencilla.

3.10. Modelado matemático

Para determinar la función de transferencia del sistema se utilizará la herramienta IDENT del software MATLAB. Esta herramienta permite determinar la función de un sistema en base a datos experimentales obtenidos en campo.

Función de Transferencia para el Sistema de Control de Presión

- 1) Escribir el comando "ident" en la Ventana de Comandos de MATLAB.

```
Command Window
>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
fx >>
```

Figura 53: Ident – Matlab.

- 2) Crear dos vectores vacíos y luego importar los datos experimentales.

```
Command Window
>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
>> FRECUENCIA = [];
>> PRESION = [];
```

Figura 54: Ident - Matlab.

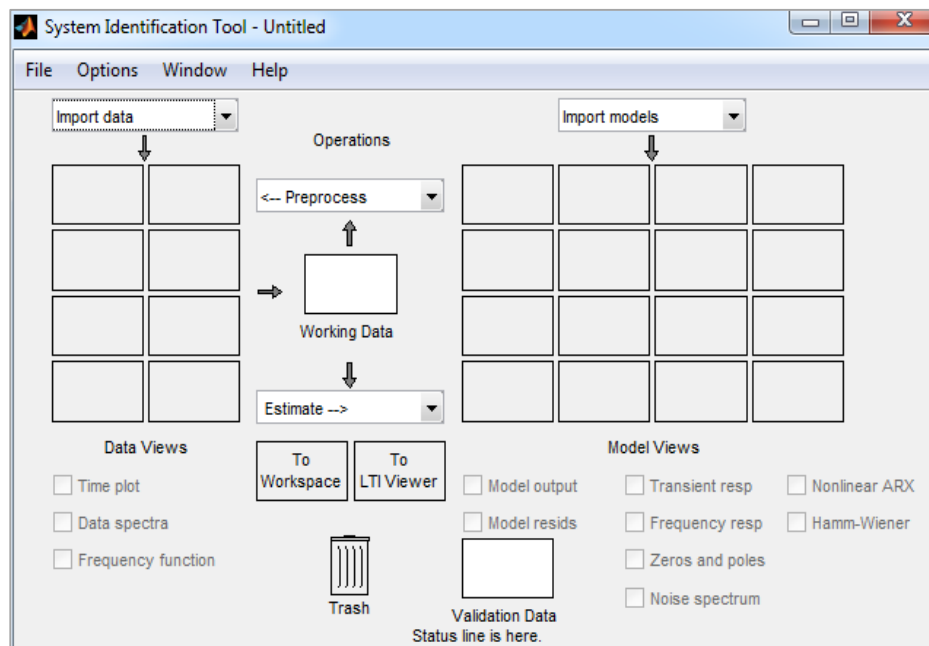


Figura 55: Import data.

	A	B	C	D	E
3					
4			Frecuencia (Hz)	Presion (PSI)	
5			25	10	
6			27	11	
7			29	11.5	
8			31	12	
9			33	12.5	
10			35	13	
11			37	13.4	
12			39	13.9	
13			41	14.5	
14			43	15	
15			45	15.6	
16			47	16	
17			49	16.4	
18			51	17	
19			53	17.5	
20			55	18	
21			57	18.4	
22			59	19	
23			60	20	

Figura 56: Datos experimentales.

Import Data

Data Format for Signals

Time-Domain Signals

Workspace Variable

Input: FRECUENCIA

Output: PRESION

Data Information

Data name: mydata

Starting time: 1

Sampling interval: 1

More

Import Reset Close Help

Figura 57: Import Data.

3) Determinar la Función de Transferencia como un sistema de primer orden.

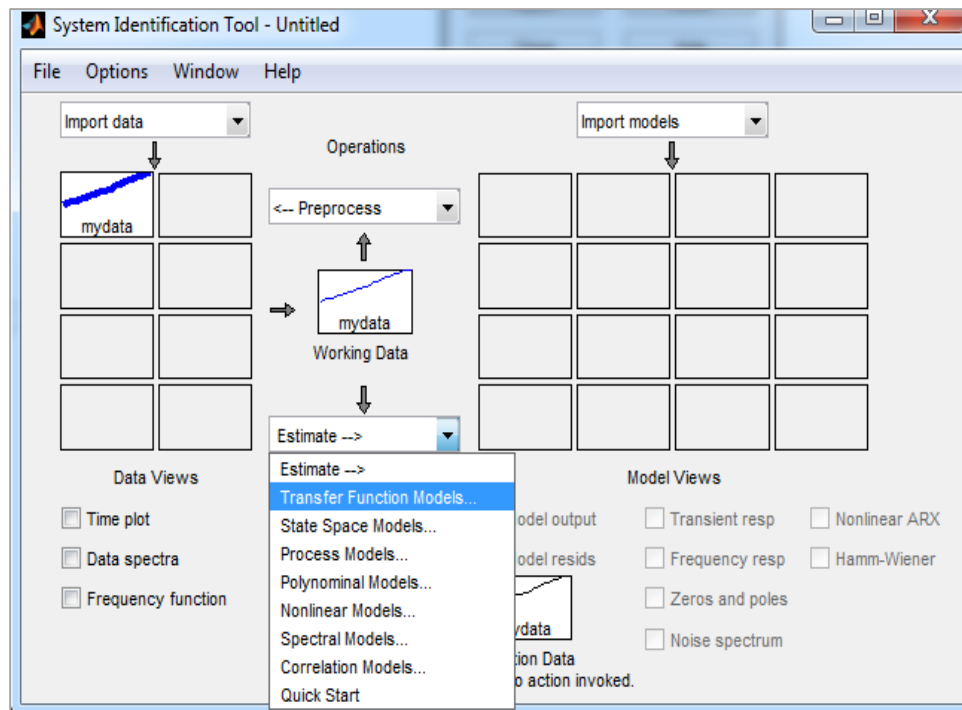


Figura 58: Transfer Function Models.

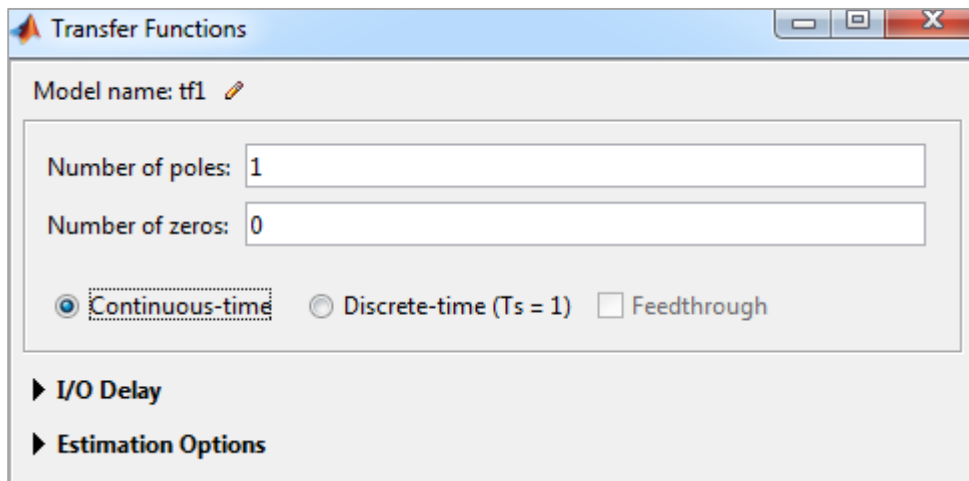


Figura 59: Transfer funtions.

```
Command Window

>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
>> FRECUENCIA = [];
>> PRESION = [];
>> tf1

tf1 =

From input "u1" to output "y1":
0.05713
-----
s + 0.1216
```

Figura 60: Programa Matlab.

4) Determinar los parámetros del controlador PID

```
1 - clear all
2 - clc
3 - num = [0.05713] % Numerador de la FT
4 - den = [1 0.1216] % Denominador de la FT
5
6 - Gp = tf(num, den) % crear la FT
7 - H = [1] % Crear el lazo cerrado con realimentacion unitaria
8
9 - M = feedback(Gp, H) % FT en lazo cerrado
10 - step(M) % Respuesta al Escalon en lazo cerrado
11 - hold on
12
13 % Inicilalizar los parametros del PID
14 - Kp = 0
15 - Ki = 0
16 - Kd = 0
17
18 - Gc = pid(Kp, Ki, Kd) % FT del controlador
19 - Mc = feedback(Gc*Gp, H) % FT en lazo cerrado del sistema
20 - step (Mc)
21 - grid on
```

Figura 61: Programa Matlab.

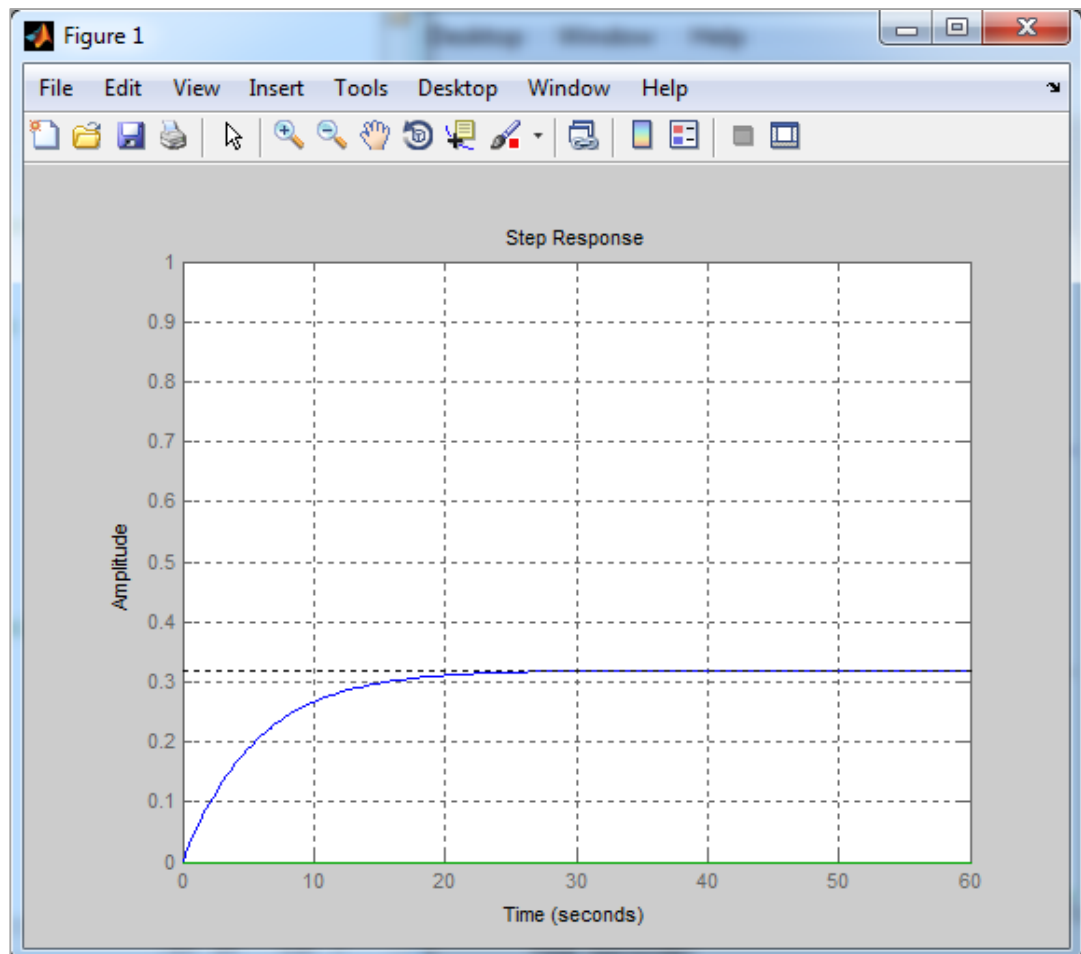


Figura 62: Programa Matlab.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - num = [0.05713] % Numerador de la FT
4 - den = [1 0.1216] % Denominador de la FT
5
6 - Gp = tf(num, den) % crear la FT
7 - H = [1] % Crear el lazo cerrado con realimentacion unitaria
8
9 - M = feedback(Gp, H) % FT en lazo cerrado
10 - step(M) % Respuesta al Escalon en lazo cerrado
11 - hold on
12
13 - % Inicializar los parametros del PID
14 - Kp = 27
15 - Ki = 3
16 - Kd = 0
17
18 - Gc = pid(Kp, Ki, Kd) % FT del controlador
19 - Mc = feedback(Gc*Gp, H) % FT en lazo cerrado del sistema
20 - step(Mc)
21 - grid on

```

Figura 63: Programa Matlab.

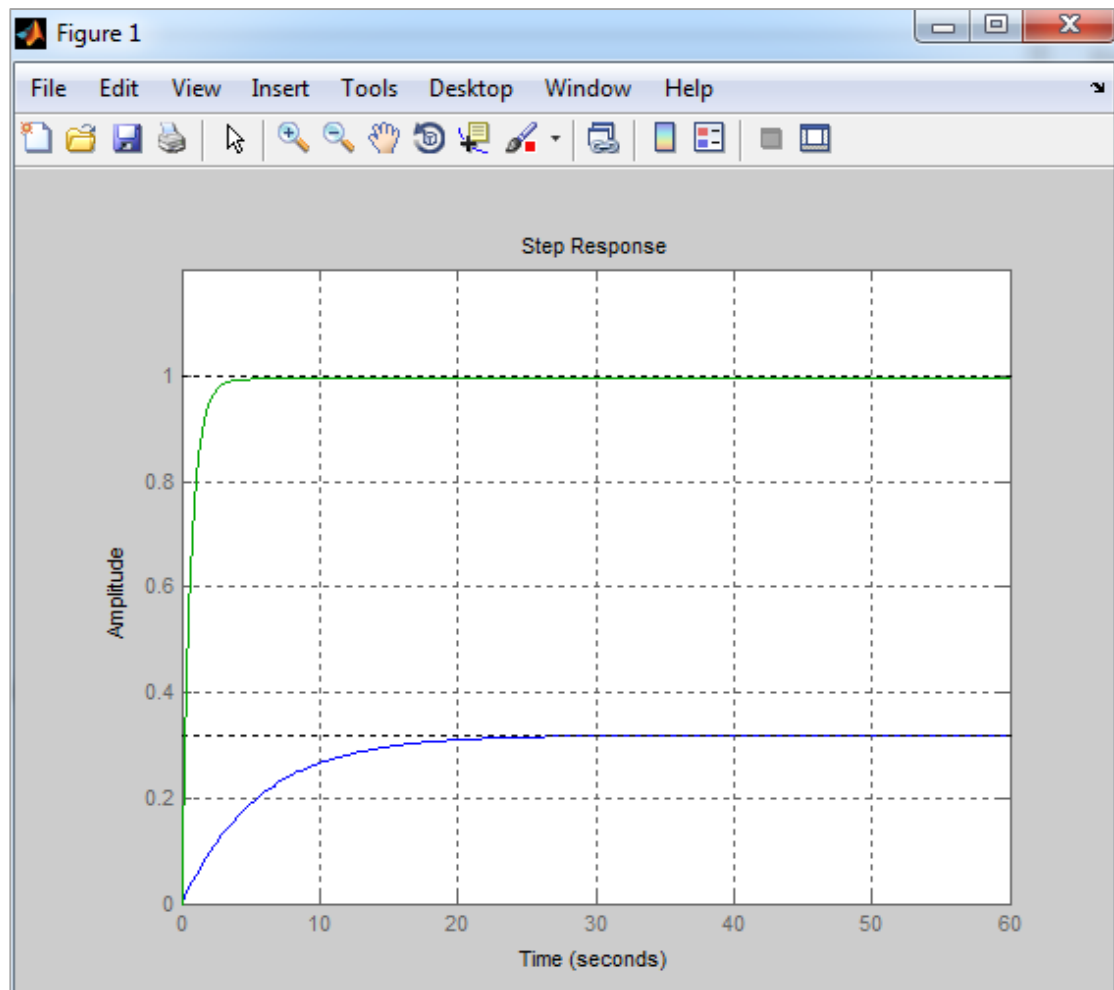


Figura 64: Programa Matlab.

```

      1
Kp + Ki * ---
      s

with Kp = 27, Ki = 3

Continuous-time PI controller in parallel form.

Mc =

      1.543 s + 0.1714
      -----
      s^2 + 1.664 s + 0.1714

Continuous-time transfer function.

```

Figura 65: Programa Matlab.

3.11. Funcionamiento del Sistema

3.11.1. Modo Manual

Este modo usualmente no funcionará, solo se usará en caso quieras probar el correcto funcionamiento del variador de velocidad y de la Electrobomba y por casos de mantenimiento.

- Poner el Selector en Manual.
- Pulsar Marcha Manual.
- La velocidad de la Electrobomba variara según el giro del potenciómetro.
- Para parar el sistema pulsar Paro Manual.
- Volver el selector en la posición neutro.

3.11.2. Modo Automático

- Poner el Selector en Automático.
- Pulsar Marcha Automático.
- El PLC estará leyendo continuamente la Presión en el sistema por medio del sensor instalado en las tuberías, cuando esta presión este más baja que la presión mínima requerida por el sistema el variador de frecuencia hará que la Electrobomba impulse mayor cantidad de agua y cuando la presión del sistema sea mayor automáticamente bajara la frecuencia de la Electrobomba.
- Cuando el sistema no detecte algún cambio de presión el variador de frecuencia estará al mínimo(25hz) ya programado en el mismo.
- Cuando el sistema este por un tiempo(programado en el variador) en el mínimo entrara en modo dormir, el variador de frecuencia automáticamente hará que la Electrobomba se apague hasta que nuevamente el sistema detecte un cambio de presión.
- Para parar el sistema pulsamos Paro Automático.
- Volver el selector en la posición neutro.

3.12. Diagrama de fuerza del sistema

Conjunto de conductores, protecciones y mecanismos, por los que pasa la corriente de alimentación al motor. Está eléctricamente separado del circuito de mando y control. (Glosario Servidor Alicante, 2017)

En el caso de nuestro circuito cuenta con un disyuntor magnetotérmico el cual se encarga de interrumpir la corriente eléctrica cuando la intensidad de corriente sobrepasa un determinado valor o porque se ha producido un cortocircuito.

Por norma para evitar riesgos incensarios, los equipos eléctricos deben ser manipulados sin carga por lo que para poder cumplir este requisito hacemos uso de un Seccionador el cual consiste en aislar la instalación de la red de alimentación eléctrica.

Como siguiente elemento contamos con el variador de velocidad el encargado de suministrar corriente a la electrobomba para que esta provea de agua con una presión constante a nuestro sistema según lo requiera.

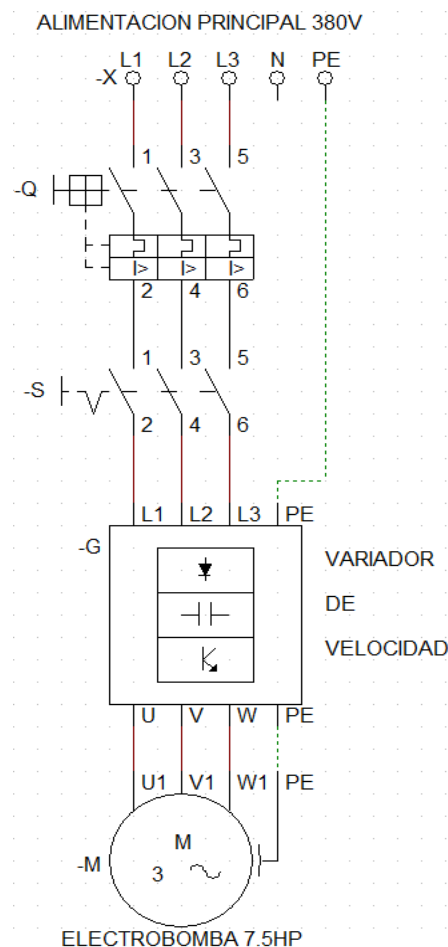


Figura 66: Circuito de Fuerza.

3.13. Programa para PLC, en lenguaje LADDER

3.1.2. Direccionamiento de variables en el PLC

Tabla 3: Direccionamiento de variables en el PLC.

Nombre	Tipo	Dirección
Sensor de Presión	Int	%IW0.2.1
Potenciómetro	Int	%IW0.2.2
Selector Manual	Ebool	%I0.1.0
Selector Automático	Ebool	%I0.1.1
Marcha Sistema	Ebool	%I0.1.2
Paro Sistema	Ebool	%I0.1.3
Falla Variador	Ebool	%I0.1.4
Presostato	Ebool	%I0.1.4
Activar Variador	Ebool	%Q0.1.16
Sistema Funcionando	Ebool	%Q0.1.17
Salida Señal Variador	Int	%QW0.2.5

3.13.1. Dimensionamiento del Bastidor

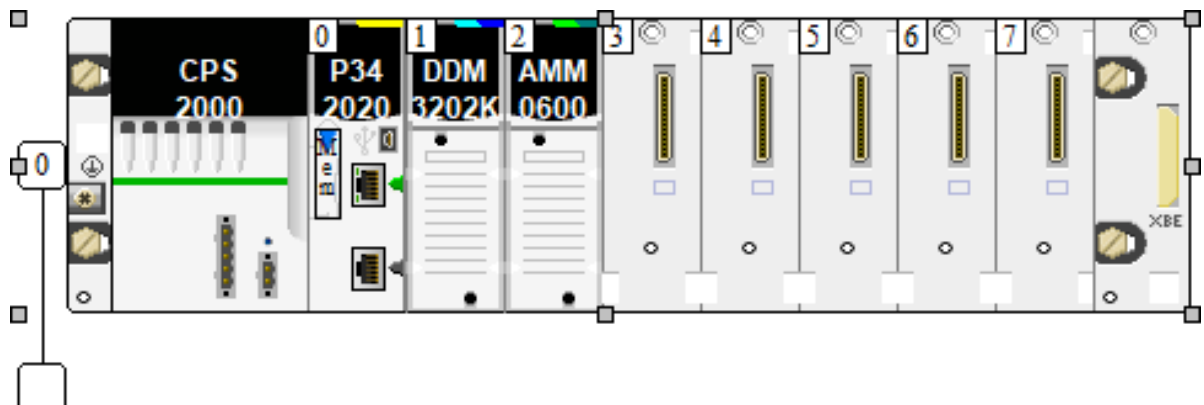


Figura 67: Bastidor.

3.13.2. Configuración Red Ethernet PLC

The screenshot displays the 'Configuración IP' (IP Configuration) window in a PLC software interface. At the top, there are tabs for 'Seguridad', 'Configuración IP' (selected), 'Mensajes', 'SNMP', 'SMTP', and 'Ancho de banda'. Below the tabs, the 'Configuración de dirección IP' (IP address configuration) section has two radio buttons: 'Configurada' (selected) and 'Desde un servidor'. The 'Configurada' option shows fields for 'Dirección IP' (192.168.1.10), 'Máscara de subred' (255.255.255.0), and 'Dirección de pasarela' (192.168.1.1). Below this is a field for 'Nombre del dispositivo'. The 'Configuración Ethernet' section at the bottom has two radio buttons: 'Ethernet II' (selected) and '802.3'.

Figura 68: Ethernet PLC.

3.13.3. Variables en el Software del PLC

Nombre	Tipo	Comentario	Dirección
Selector_Manual	EBOOL	Selector Modo Manual	%I0.1.0
Selector_Automatico	EBOOL	Selector Modo Automatico	%I0.1.1
Marcha_Sistema	EBOOL	Marcha del Sistema en Modo Automatico	%I0.1.2
Paro_Sistema	EBOOL	Paro del Sistema en Modo Automatico	%I0.1.3
Falla_Variador	EBOOL	Entrada Falla Variador	%I0.1.4
Presostato	EBOOL	Entrada Alerta Presostado	%I0.1.5
Presion	INT	Entrada Presion 4-20mah	%IW0.2.1
Pot_Manual_Presion	INT	Potenciometro	%IW0.2.2
M_Activar_Variador	EBOOL		%M0
M_Automatico_Funcionando	EBOOL		%M1
M_Falla_Variador	EBOOL		%M2
M_Marcha	EBOOL		%M3
M_Paro	EBOOL		%M4
M_Lampara_SF	EBOOL		%M5
M_Marcha_HMI	EBOOL		%M5
M_Manual_Funcionando	EBOOL		%M6
M_Paro_HMI	EBOOL		%M6
M_Presostato	EBOOL		%M12
M_Selector_Automatico	EBOOL		%M13
M_Selector_Manual	EBOOL		%M14
M_Sistema_Funcionando	EBOOL		%M15
M_PID	REAL		%MW0
M_Pot	INT		%MW1
M_Pot_Real	REAL		%MW2
M_presion	INT		%MW4
M_Presion_Scaling	REAL		%MW6
M_Presion_Sistema	INT	Presion del Sistema	%MW7
M_Salida_PID	INT		%MW8
M_Salida_Variador	INT		%MW9
M_Salida_Variador_Real	REAL		%MW10
M_Pot_Scaling	REAL		%MW20
M_presion_Real	REAL		%MW30
M_Variador_PID	REAL		%MW40
Salida_Activar_Variador	EBOOL	Salida Activar Variador	%Q0.1.16
Lampara_Sistema_Funcionando	EBOOL	Lampara Sistema Funcionando	%Q0.1.17
Salida_Variador	INT	Salida valor PID al Variador	%QW0.2.5

Figura 69: Variables PLC.

3.13.4. Programa para PLC

3.13.4.1. Programa Ladder

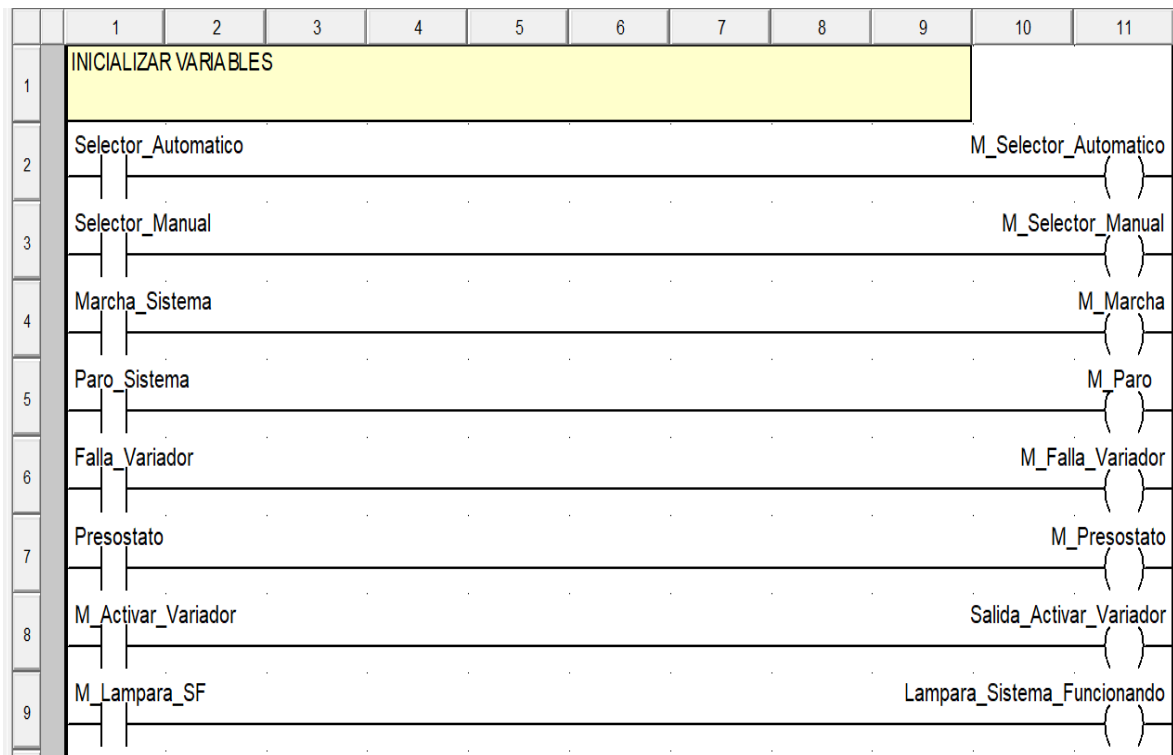


Figura 70: Programa PLC.

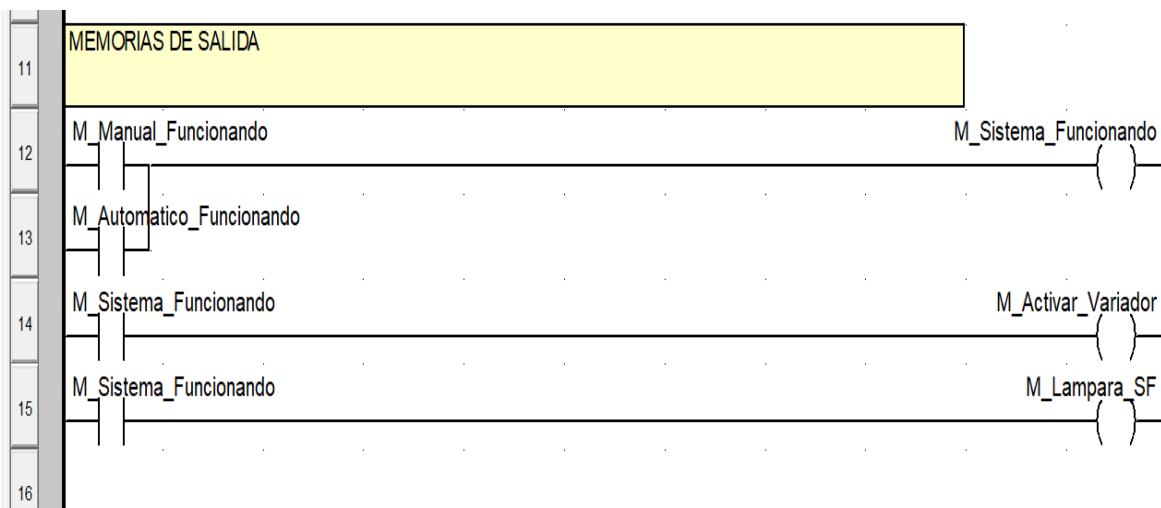


Figura 71: Programa PLC.

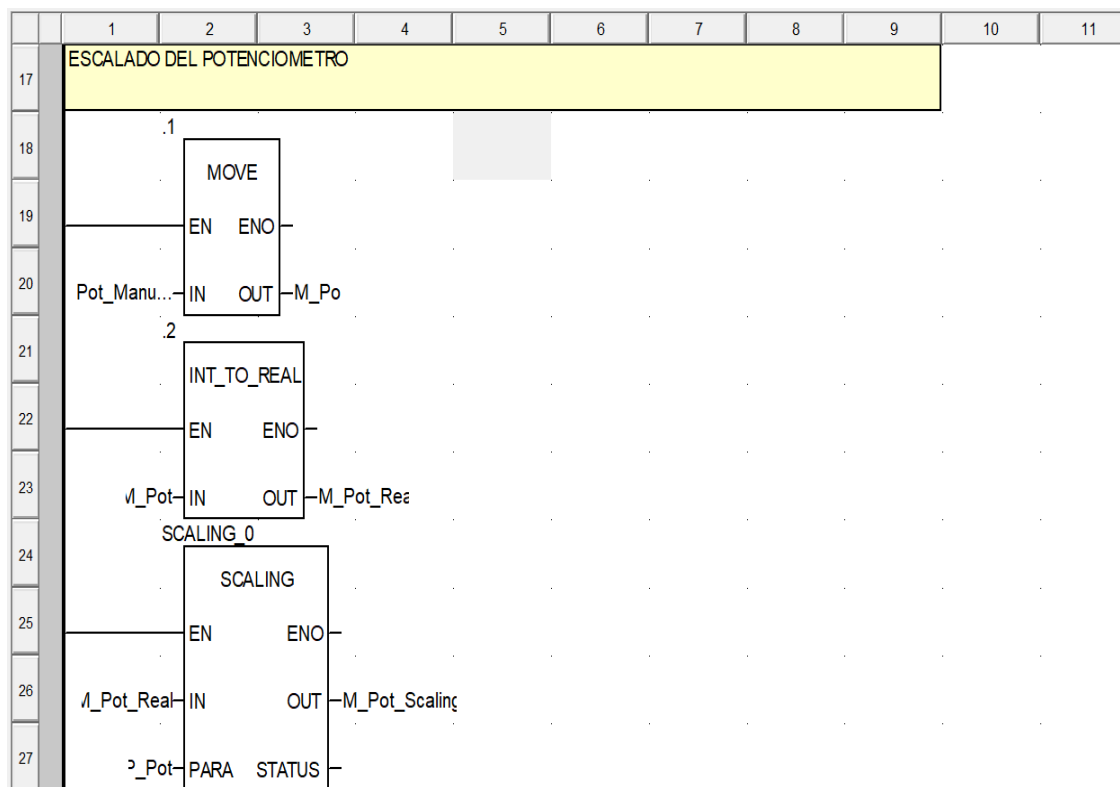


Figura 72: Programa PLC.

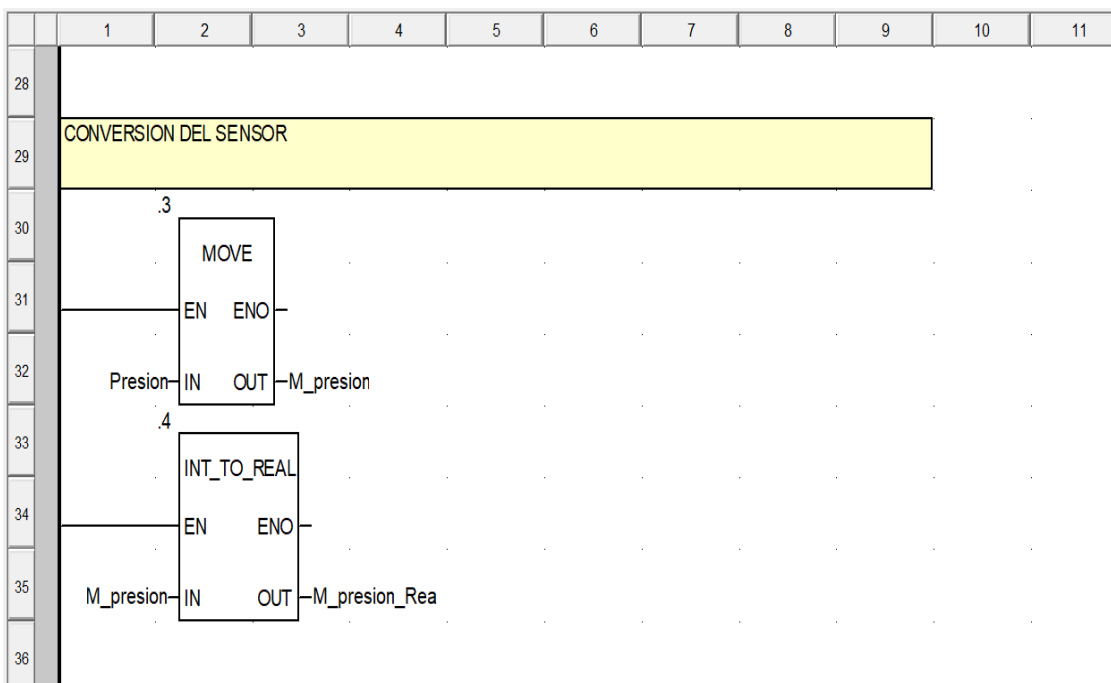


Figura 73: Programa PLC.

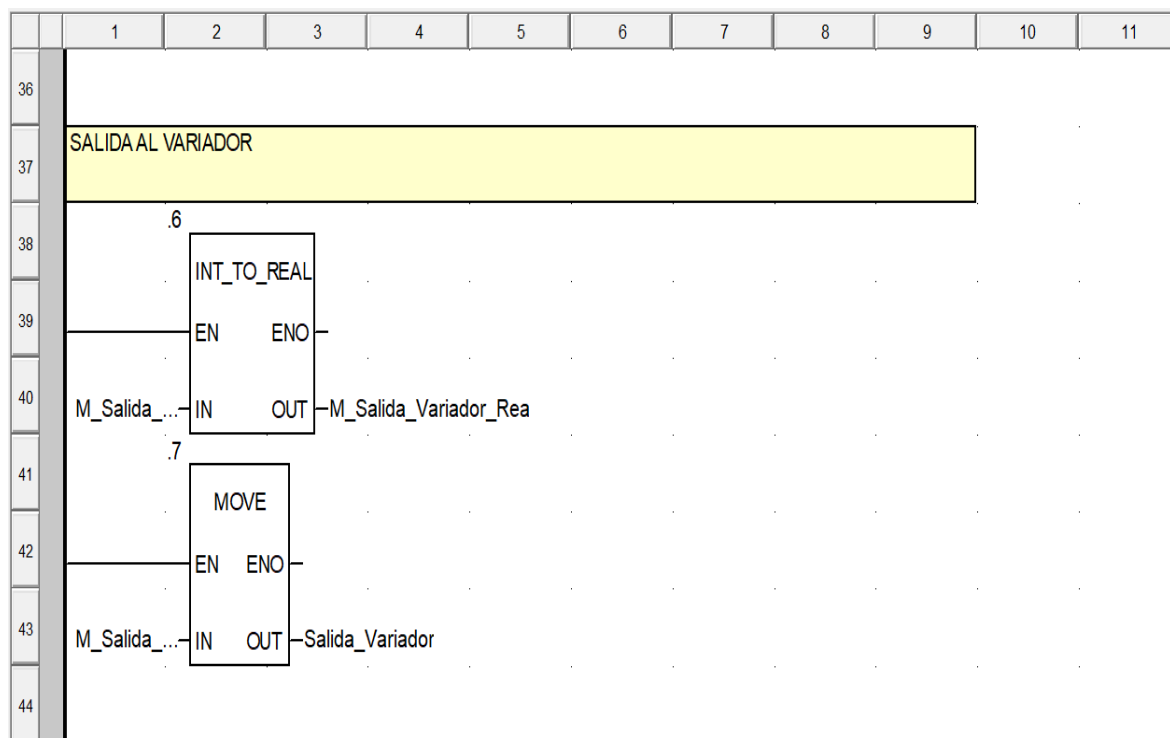


Figura 74: Programa PLC.

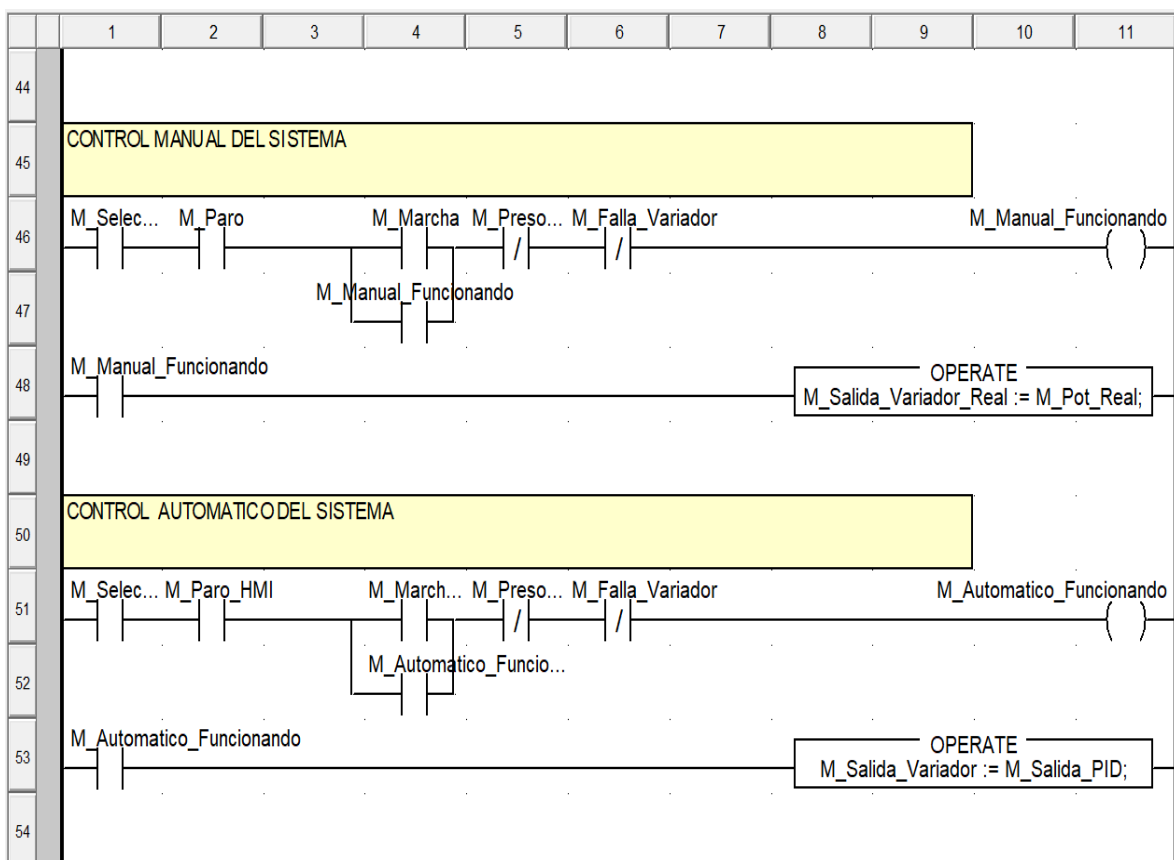


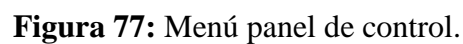
Figura 75: Programa PLC

The diagram illustrates a PID control system using three functional blocks:

- INT_TO_REAL Block:**
 - Input: `M_Presion_Sistema` (connected to terminal 3).
 - Output 1: `M_Automatico_Funcionando` (connected to terminal 1).
 - Output 2: `M_presion_Real` (connected to terminal 2).
- PIDF_1 Block:**
 - Input 1: `PIDF_1` (terminal 1).
 - Input 2: `ENO` (terminal 2).
 - Input 3: `OUTD` (terminal 3).
 - Input 4: `MA_O` (terminal 4).
 - Input 5: `INFO` (terminal 5).
 - Input 6: `STATUS` (terminal 6).
 - Input 7: `M_PID` (terminal 7).
 - Input 8: `OUT` (terminal 8).
 - Input 9: `TR_S` (terminal 9).
 - Input 10: `TR_I` (terminal 10).
 - Input 11: `PARA` (terminal 11).
 - Input 12: `MAN_AUTO` (terminal 12).
 - Input 13: `RCPV` (terminal 13).
 - Input 14: `FF` (terminal 14).
 - Input 15: `SP` (terminal 15).
 - Input 16: `PV` (terminal 16).
 - Input 17: `EN` (terminal 17).
- REAL_TO_INT Block:**
 - Input: `M_Variador_PID` (connected to terminal 1).
 - Output: `M_Salida_PID` (connected to terminal 2).

3.13.5. Configuración Variador de Frecuencia

Por medio de nuestro panel de control pulsamos la tecla multifunción de la derecha, accediendo de esta forma al menú principal, donde nos encontraremos la siguiente pantalla:



Pulsamos la tecla multifunción de la derecha, que nos ofrece la opción “INTRO”, y nos aparece otro menú como el siguiente:

REM	↺	GRUPO PARAM	01
01		DATOS FUNCIONAM	
03		SEÑALES ACT BC	
04		HISTORIAL FALLOS	
10		MARCHA/PARO/DIR	
11		SELEC REFERENCIA	
SALIR			SEL

Figura 78: Parámetros panel de control.

De nuevo, con las flechas arriba / abajo seleccionaremos el grupo de parámetros en el que se encuentra nuestro parámetro a cambiar.

3.13.5.2. Lista de Parámetros Por Modificar

Tabla 4: Lista de parámetros para modificar.

GRUPO 99: DATOS DE PARTIDA				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
9901	Idioma	4	Español	
9902	Aplicación	7	PFC	
9904	Modo control motor	3	Escalar frecuencia	
9905	Tensión nominal motor		380 V	Tensión nominal motor en V.
9906	Intensidad nominal motor		4.5 A	Intensidad nominal motor en A.
9907	Frecuencia nominal motor		60 Hz	Frecuencia nominal motor en Hz.
9908	Velocidad nominal motor		1450	Velocidad nominal motor en rpm.
9909	Potencia nominal motor		Kw	Potencia motor en Kw.
GRUPO 10: MARCHA / PARO / DIRECCIÓN				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
1001	Comando exterior 1	0	SIN SEL	
1002	Comando exterior 2	5	ED5	Define la marcha del equipo
GRUPO 11: SELECCIÓN DE REFERENCIA				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
1101	Selección referencia panel	2	REF 2 %	
1102	Selección EXT 1 / EXT 2	7	EXT 2	
1103	Selección REF 1	0	Panel	
1104	Ref. 1 Mínimo		0 Hz	
1105	Ref. 1 Máximo		60 Hz	
1106	Selección referencia 2	1	EA1	

GRUPO 13: ENTRADAS ANALÓGICAS				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
1304	Mínimo ent. analógica 2		20 %	Para entradas 4 – 20 ma
1305	Máximo ent. analógica 2		100 %	
1306	Filtro entrada analógica 2		0.2 Seg.	Filtra la entrada del transductor
GRUPO 16: CONTROLES DEL SISTEMA				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
1601	Permiso de marcha	0	SIN SEL	
1602	Bloqueo parámetros	1	ABIERTO	
1603	Código de acceso	358	*	Para desbloquear parámetros
1604	Reset de fallos	0	Panel	
1605	Camb. ajuste par. Usuario	0	SIN SEL	
1606	Bloqueo local	7	SI	Inhabilita la tecla LOC del panel
GRUPO 20: LÍMITES				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
2003	Intensidad máxima		I.n. x 1.5	1,5 veces la intensidad nominal
2007	Frecuencia mínima		25 Hz	30 Hz para motores FRANKLIN
2008	Frecuencia máxima		52 Hz	
GRUPO 21: MARCHA / PARO				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
2101	Función marcha	1	Auto	
2102	Función de paro	1	Paro libre	
GRUPO 30: FUNCIONES FALLOS				
Param.	Descripción	Nº	Programación	Notas
3001	Entrada analógica min.	1	Fallo	
3002	Pérdida de panel	3	Ultima velocidad	
3010	Función bloqueo	1	Fallo	
3022	Limite fallo ent. analógica		15%	Fallo por debajo de 3 mA
GRUPO 31: REARRANQUES AUTOMÁTICOS				
Para m.	Descripción	Nº	Programación	Notas
3101	Numero de tentativas		5	
3102	Tiempo de tentativas		30 Seg.	
3103	Tiempo de demora		5 Seg.	
3104	Sobre intensidad	1	Activar	
3105	Sobre tensión	1	Activar	
3106	Subtensión	1	Activar	

Product datasheet (Anexo F)

3.14. Panel HMI

El HMI es el medio que nos permite ejecutar control y supervisión de la planta de manera inmediata y siempre se encuentra activo. Este HMI presenta funciones de supervisión solamente, así como también nos permite realizar modificaciones de control de mando en el proceso y los parámetros de control del controlador PID.

Debido a restricciones de los componentes del sistema, el escalamiento de nuestras señales está limitado a un rango de 0 a 10bar. Por lo tanto, si es que en algún momento el usuario ingresa valores menores o mayores a este rango, el programa automáticamente lo rectificará hacia el valor permisible más cercano.

- Configuración Conexión HMI – PLC
 - 1) Para configurar la comunicación con el PLC clic derecho en administrador de e/s y agregamos un nuevo controlador

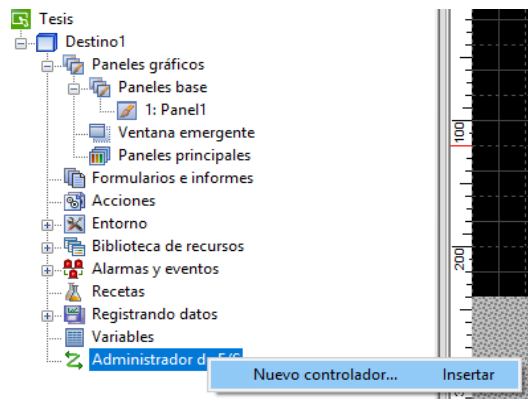


Figura 79: Configuración HMI en Vijeo Designer.

- Seleccionamos ModbusTCP/IP

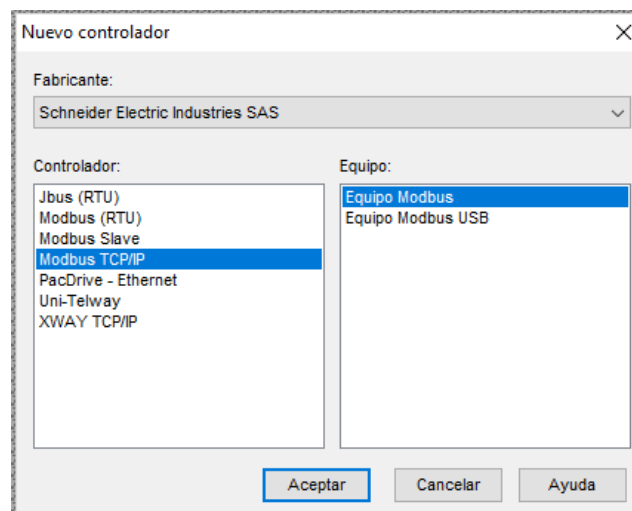


Figura 80: Configuración HMI en Vijeo Designer.

- Ingresamos la IP de nuestro PLC y habilitamos la norma IEC61131

Figura 81: Configuración Comunicación PLC-HMI.

Aquí se puede observar las alarmas de nivel alto y bajo, el tipo de control (Local o Automático) y un indicador de sistema funcionando. También se puede configurar el valor del Setpoint y de los parámetros PID. En el caso que el HMI tenga el control el botón MARCHA – PARO determina el inicio y fin de la operación.

- Presentación HMI

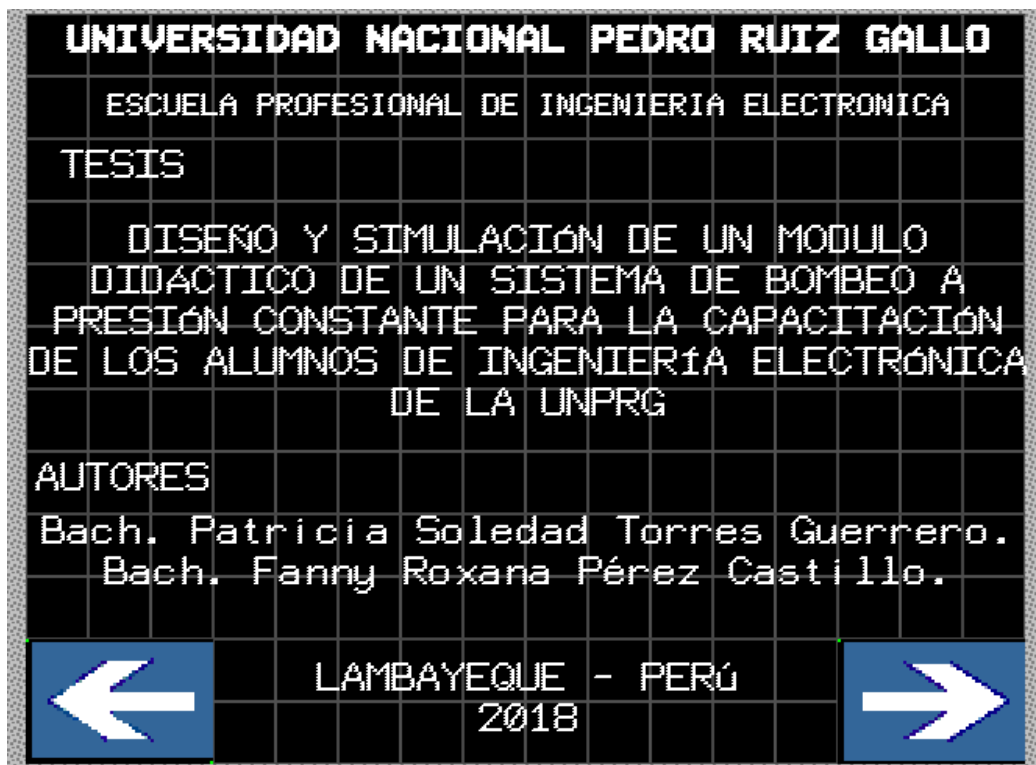


Figura 82: Carátula HMI.

- Panel principal HMI



Figura 83: Panel principal HMI.

- Panel control HMI

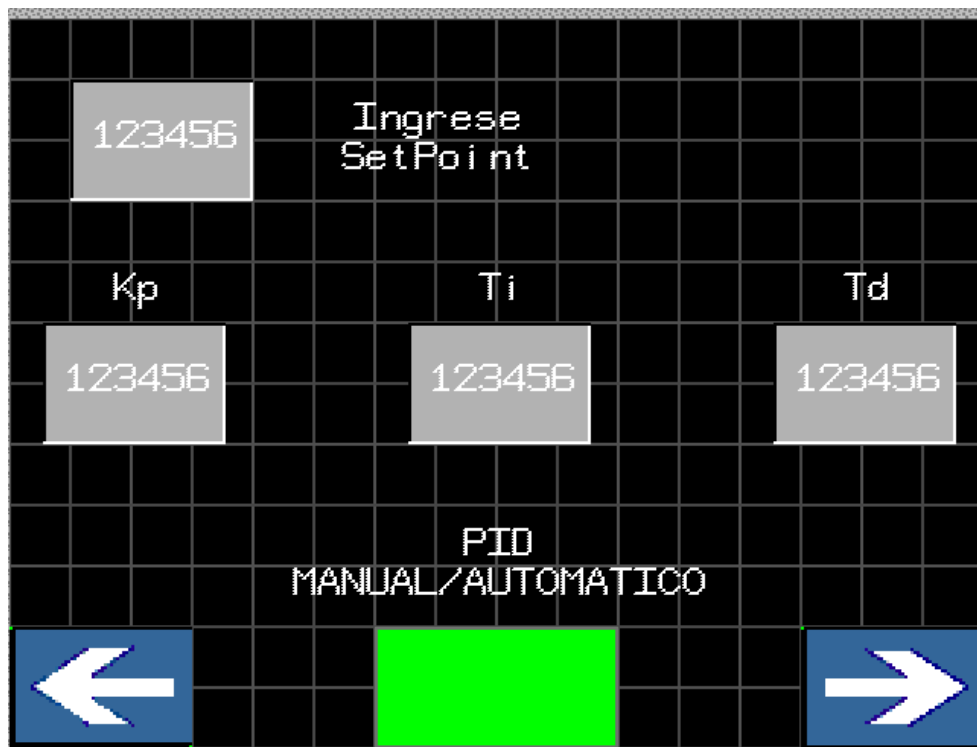


Figura 84: Panel control HMI.

3.15. Diseño 3D del módulo

Se presenta el diseño del módulo en 3D realizado en el Software AUTOCAD, esto para conocer la posición de los componentes tanto hidráulicos como el tablero eléctrico del sistema.

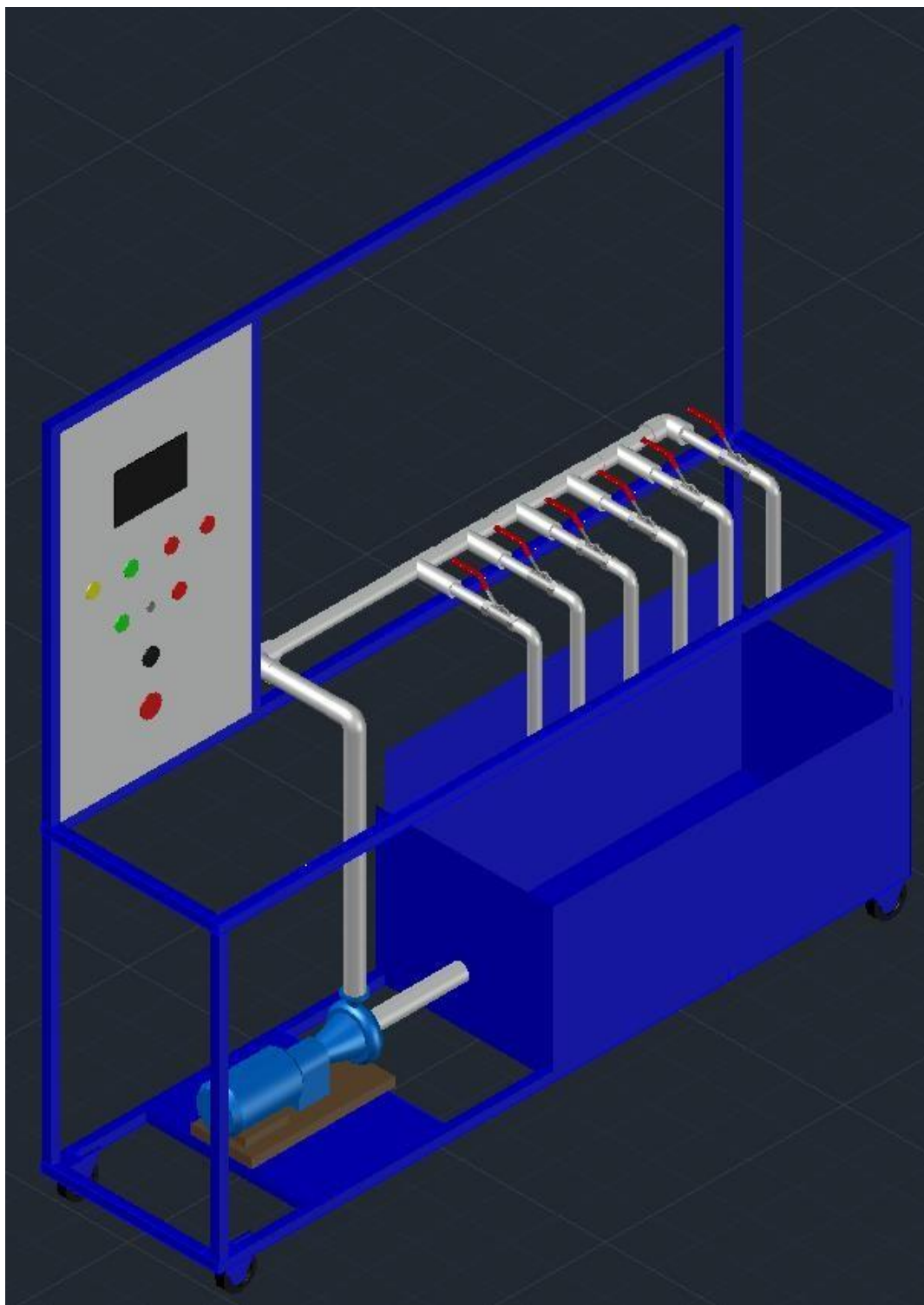


Figura 85: Diseño 3D módulo.

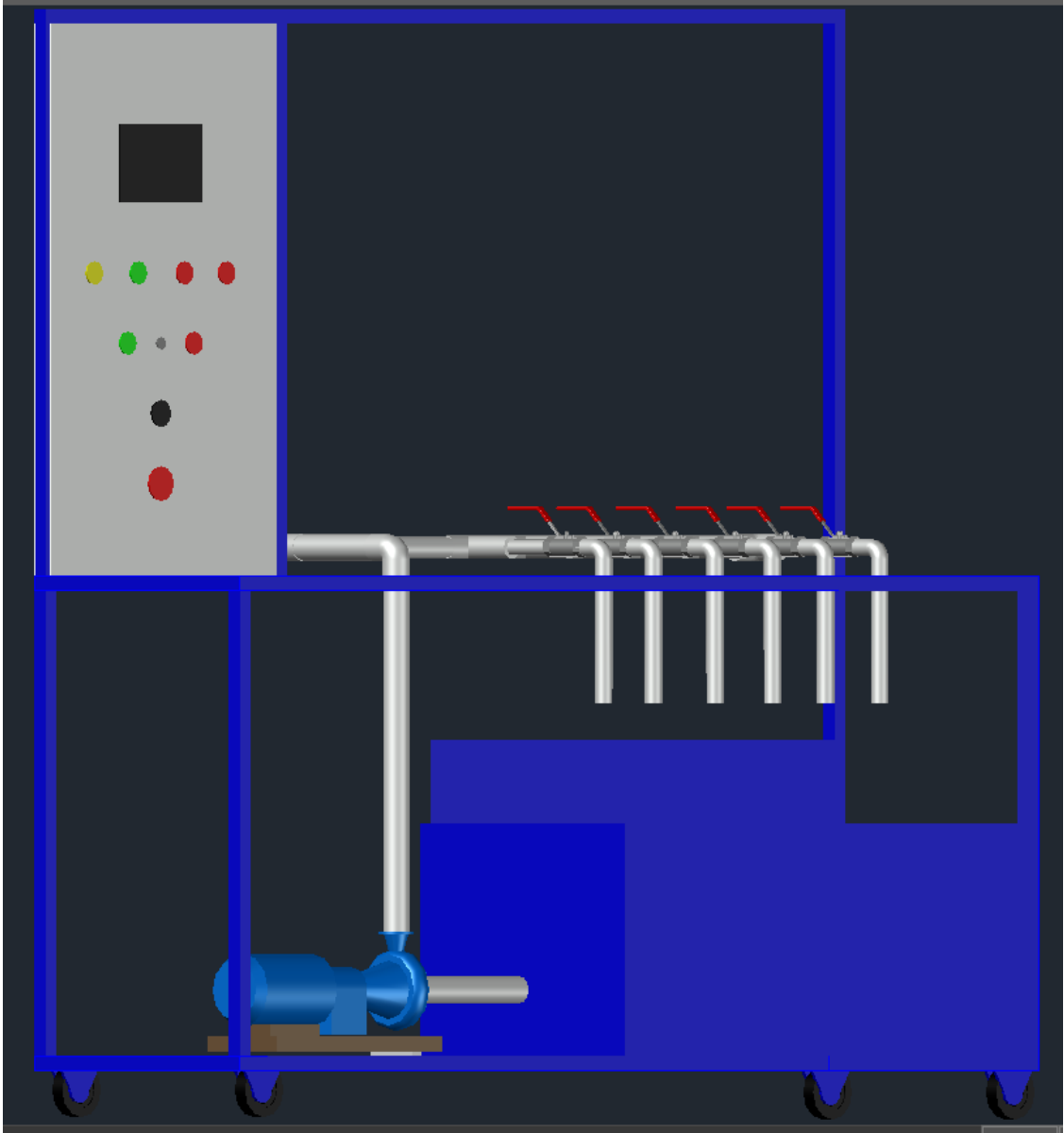


Figura 86: Diseño 3D módulo.

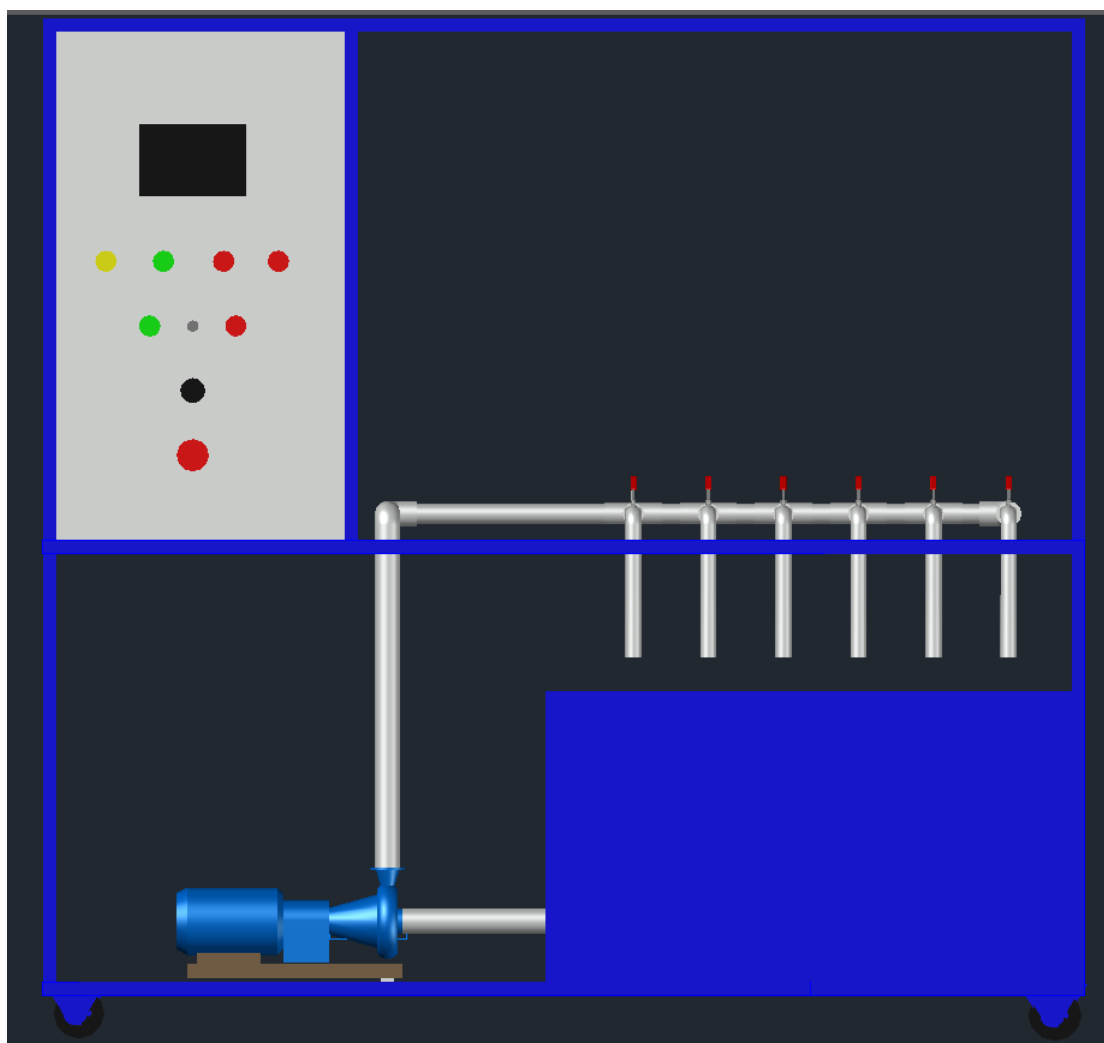


Figura 87: Diseño 3D módulo.

3.16. Presupuesto

3.1.1. Costos de Hardware

Tabla 5: Costos de Hardware.

ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO
Sensor de Presión XMLK025B2C21	1	S/. 664.40
Presostato	1	S/. 214.30
Variador de Frecuencia ACS310	1	S/. 1 011.31
CPU BMX P34 2020	1	S/. 2 434.30
BMX AMM 0600	1	S/. 1 740.57
BMX DDM 3202K	1	S/. 1 071.28
BMX CPS 3500	1	S/. 2 584.88
Electrobomba Pentax 1.5HP	1	S/. 1 500
Tablero Eléctrico	1	S/. 300
Rollo 100m de cable INDECO	1	S/. 169.90
Interruptor Schneider Tripolar	1	S/. 95
Interruptor Schneider Automático Tripolar	1	S/. 626
Otros (Riel, Canaletas, Tornillos, etc.)	1	S/. 100
	TOTAL	S/. 9 926.66

3.1.2. Costos de Software

No se consideran costos de Software dado que la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo cuenta con ambos softwares usados para el diseño del módulo.

Tabla 6: Costos de Software.

PROGRAMA	CANTIDAD	PRECIO
Unity PRO	1	S/. 0
Vijeo Designer	1	S/. 0
	TOTAL	S/. 0

3.1.3. Costos totales

Tabla 7: Costos totales.

DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
Costo de Hardware	S/. 9 926.66
Costo de Software	S/. 0
Costo de Ingeniería	S/. 2 500.00
Costo de Instalación	S/. 1 000.00
Costo de Capacitación(8 horas)	S/. 500.00
TOTAL	S/. 13 926.66

SIMULACIÓN DEL SISTEMA

CAPÍTULO IV

4.1. Simulación del sistema

Para probar el funcionamiento y rendimiento del módulo de bombeo a presión constante mediante la aplicación “LabVIEW”, Se valido el escenario de operación en la figura 75 donde al abrir válvulas la presión aumenta por lo que el sistema tiene que estabilizarse y por medio del PID programado volver a la presión según el setpoint deseado.

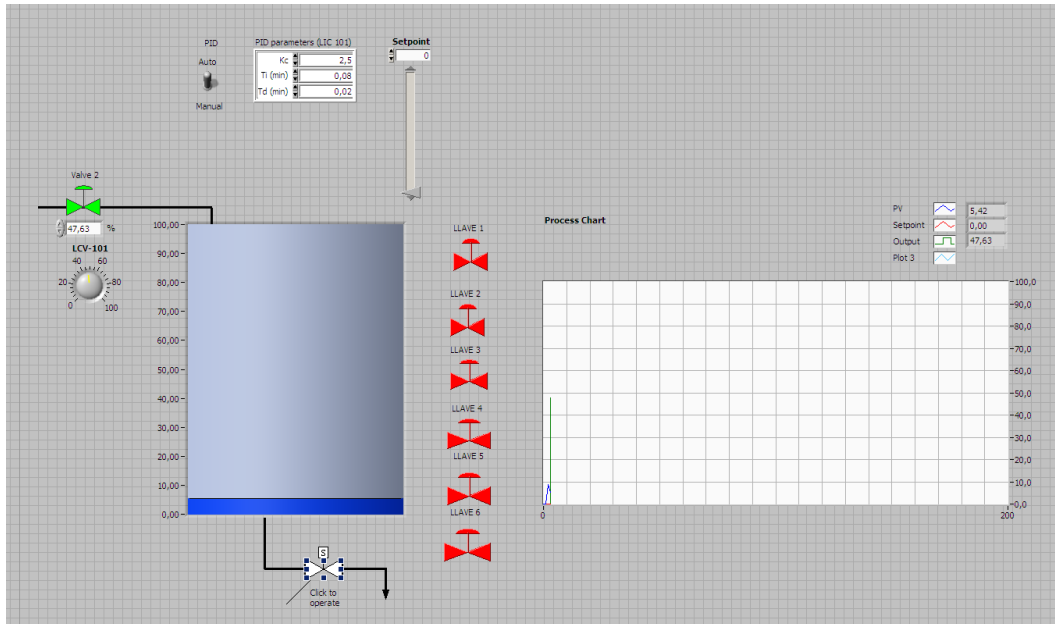


Figura 88: Simulación del sistema.

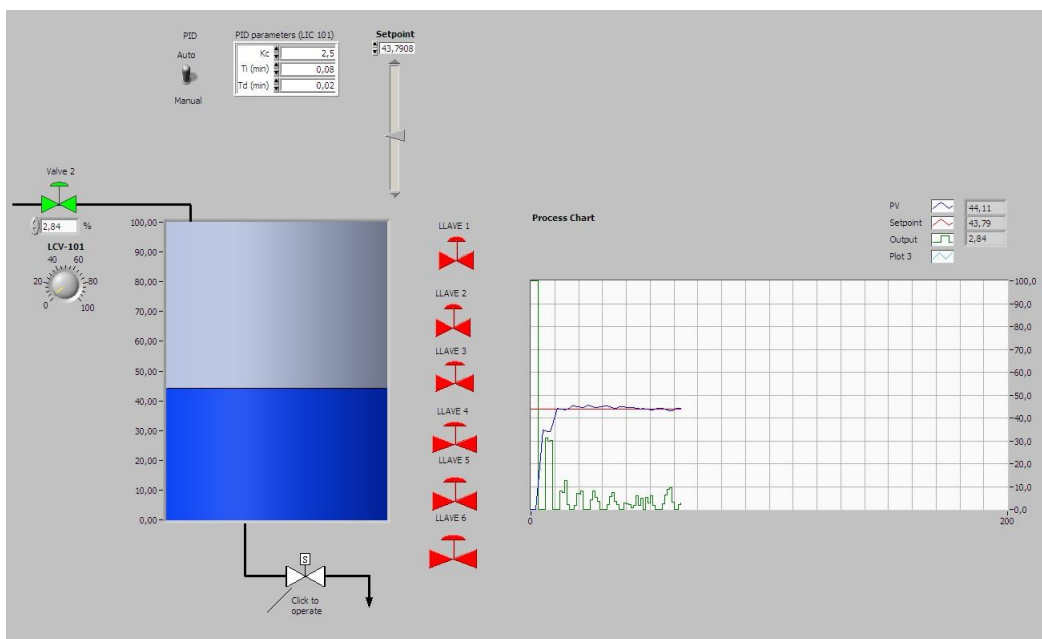


Figura 89: Simulación del sistema.

Al activar las diferentes llaves la presión del sistema aumenta por lo que ejecutando el PID este tiene que estabilizarse a su setpoint deseado tal cual se muestra en la figura 76.

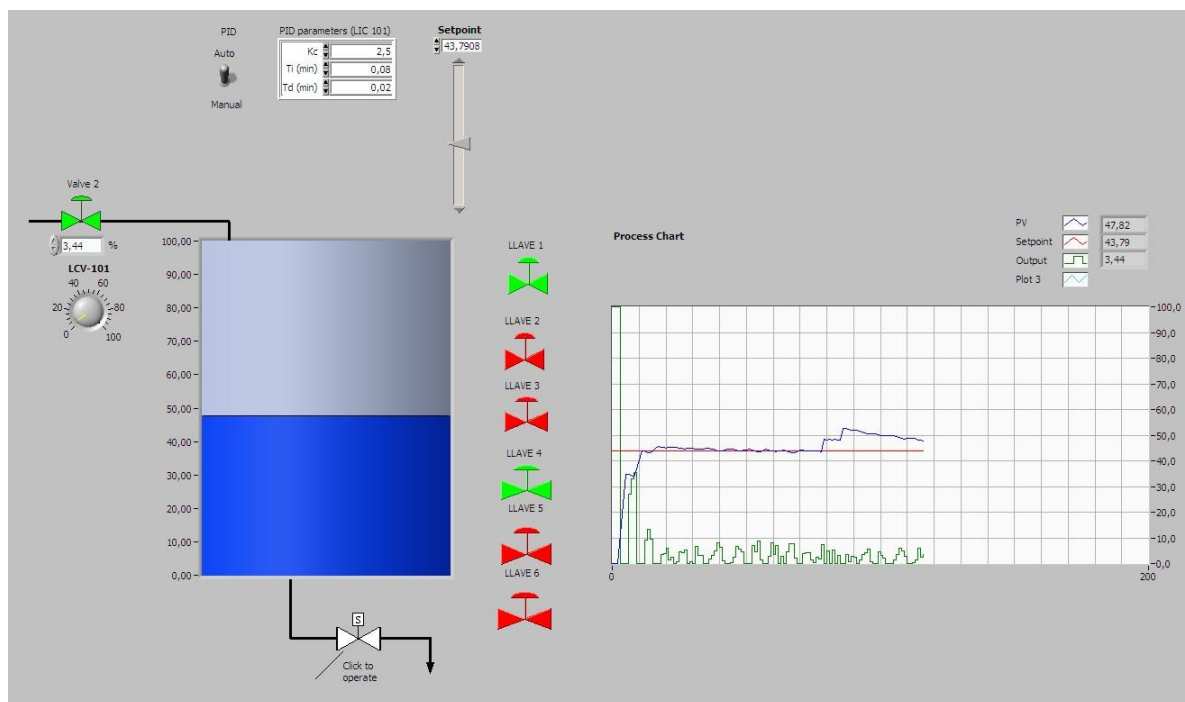


Figura 90: Simulación del sistema.

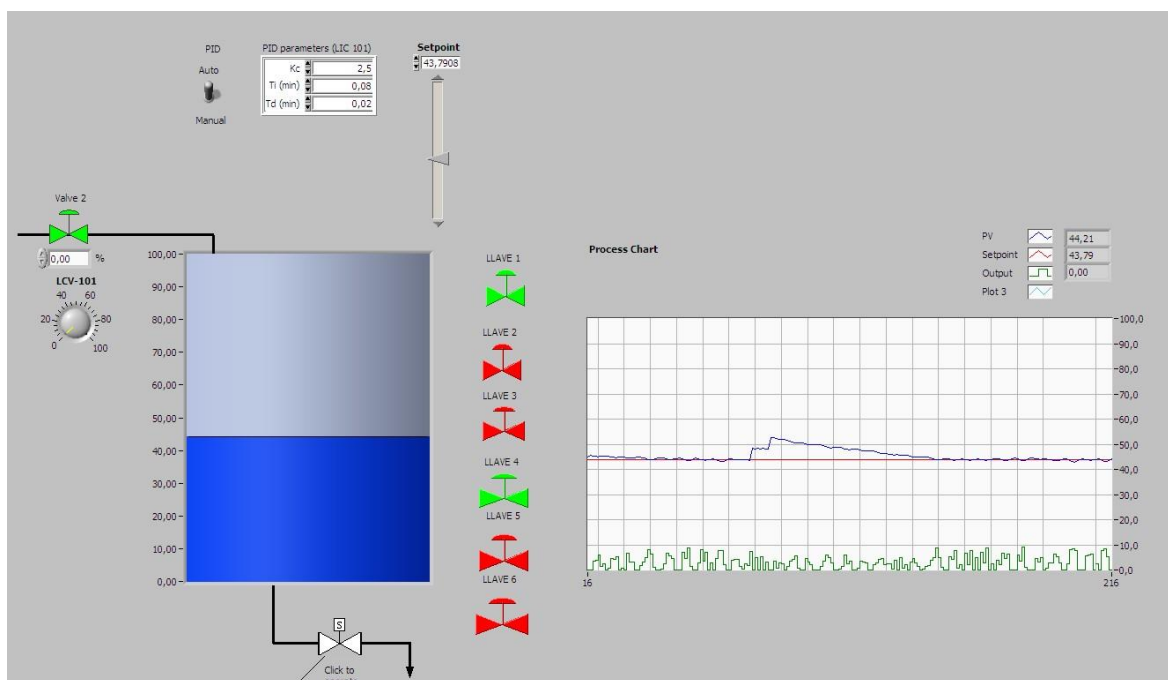


Figura 91: Simulación del sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- 1) Se desarrolló satisfactoriamente el diseño de un Módulo didáctico de un sistema de bombeo a presión constante para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.
- 2) Se logró determinar el fabricante y equipo de acuerdo con los requerimientos de un sistema de presión constante.
- 3) Se seleccionó adecuadamente los sensores y actuadores.
- 4) Se diseñó el circuito de fuerza.
- 5) Se seleccionó correctamente el software (LabVIEW) que permitió la simulación del módulo.
- 6) Se logro el diseño estructural del Módulo en 3D.
- 7) Con la implementación de un módulo de un sistema de bombeo a presión constante servirá para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

RECOMENDACIONES

1) Ajuste y calibre del sistema

Los sistemas de bombeo a presión constante deben ser calibrados para comprobar que operan según las condiciones de diseño. Las modificaciones al sistema enfocadas a mejorar la uniformidad, corregir presiones de operación o reparar fugas, podrían ahorrar agua.

2) Gestionar cursos de capacitación y entrenamiento para la difusión de la plataforma LabVIEW.

3) Para la protección de los módulos de entrada/salida del PLC, se recomienda reemplazar las borneras existentes por borneras tipo fusible para evitar daño por cortocircuito a los módulos y/o equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

- ABB. (s.f.). ABB. Obtenido de ABB: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- Andrew, W. (2002). Instrumentación Aplicada en los Procesos Industriales. Editorial L&M.
- C., E. V. (s.f.). Actuadores.
- Carlos A. Smith, & Armando B. Corripio. (1991). Control Automático de Procesos. Editorial Limusa.
- Crespo, W. (09 de Febrero de 2011). automatizacionindustrial. Obtenido de automatizacionindustrial: <https://automatizacionindustrial.wordpress.com/2011/02/09/queeslaautomatizacionindustrial/>
- García, R. P., Reinoso García, O., García Aracil, N., & Aracil Santonja, R. (2003).
Apuntes de Sistemas de Control. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Laura Vanessa Arenas Montaña, Arturo José Castilla De Cuba, & Danilo Alfonso Rojas Méndez. (s.f.).
Interfaz Hombre Maquina.
- MATLAB - MathWorks. (s.f.). MATLAB . Obtenido de MATLAB : MATLAB
- Miguel. (11 de Marzo de 2015). Control Real Español. Obtenido de Control Real Español: <http://controlreal.com/es/controlador-logico-programable-plc/>
- Narvaez, F. H. (2000). Sistema de bombeo de agua a presión constante mediante la aplicación de
variadores de velocidad. Quito.
- Novelo, D. A. (11 de Febrero de 2013). Obtención de la Función de Transferencia de Sistemas
mediante la Identificación Paramétrica a partir de datos Experimentales. INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE MÉRIDA, 2-9.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- Paredes Arévalo, Y. A. (6 de Junio de 2015). Repositorio digital de tesis PUCP. Obtenido de
Repositorio digital de tesis PUCP:

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6062102>

Pesántez Erazo, A. A. (30 de Mayo de 2012). Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de Repositorio Institucional de la Escuela Superior

Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1881>

Repositorio digital de tesis PUCP. (12 de Mayo de 2017). Obtenido de Repositorio digital de tesis

PUCP: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/8629>

Researchgate. (15 de Julio de 2015). Obtenido de Researchgate:

https://www.researchgate.net/publication/45228880_Disenio_y_construccion_de_un_modulo_didactico_de_control_de_flujo

Sánchez, J. A. (2003). Control Avanzado de Procesos. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital . (2011). Obtenido de Universidad Salesiana

Ecuador Repositorio Digital : <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1679>

Vera Freire, D. M., & Vera Freire, H. A. (2013). Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital.

Obtenido de Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital:

<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1618>

Villajulca, J. C. (22 de Septiembre de 2012). Instrumentación y Control.net. Obtenido de

Instrumentación y Control.net: <http://instrumentacionycontrol.net/configuraciones-deplc-compactos-y-modulares/>

WisGEEK community. (s.f.). Obtenido de WisGEEK

community: <http://www.wisgeek.com/what-ishuman-machine-interface.htm>