



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MINI PLANTA INDUSTRIAL
DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:

**Bach. Jordan Cuña Martin Michael
Bach. Vasquez Velasco Heyser Abel**

ASESOR:

Ing. Romero Cortez Oscar Ucchelly

**LAMBAYEQUE-PERÚ
2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MINI PLANTA INDUSTRIAL
DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA DE LA UNPRG.”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES

Bach. Jordan Cuña Martin Michael

Bach. Vasquez Velasco Heyser Abel

ASESOR:

Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MINI PLANTA INDUSTRIAL
DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL 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. Carlos Leonardo Oblitas Vera
SECRETARIO**

**MG. Ing. Martin Augusto Nombera Lossio
VOCAL**

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a Dios por brindarnos la vida , a nuestros padres y hermanos que quienes confiaron en nuestras capacidades y nos apoyaron moral y económicamente a obtener este nuevo triunfo en nuestras vidas.

AGRADECIMIENTO

Gracias a nuestra Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por haber permitido formarnos en ella; si bien ha requerido esfuerzo y mucha dedicación propia, agradezco a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta se verá reflejado en la culminación de nuestro proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
CAPÍTULO I.....	17
1.1. INFORMACIÓN GENERAL	18
1.2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.3. DISEÑO TEÓRICO.....	20
1.4. DISEÑO METODOLÓGICO.....	22
MARCO TEÓRICO	23
CAPÍTULO II	23
2.1. FLUIDOS (Soriano, s.f.)	24
2.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS (Soriano, s.f.).....	25
2.2.1. DENSIDAD	25
2.2.1. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	25
2.2.2. PESO ESPECÍFICO	26
2.2.3. VISCOSIDAD	26
2.2.4. COMPRESIBILIDAD	27
2.2.5. TENSIÓN SUPERFICIAL	28
2.2.6. MASA ESPECÍFICA	29
2.3. ANÁLISIS PUNTUAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS FLUIDOS (Soriano, s.f.)	29
2.3.1. EL TEOREMA DE BERNOULLI	29
2.3.2. FLUJOS VISCOSOS: MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO	30

2.3.3.	NÚMERO DE REYNOLDS	31
2.3.4.	FLUJOS COMPRESIBLES.....	33
2.3.5.	LEY DE POISEUILLE	34
2.3.6.	PERFIL DE VELOCIDADES.....	35
2.4.	AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.....	36
2.5.	SISTEMAS DE CONTROL.....	36
2.5.1.	ELEMENTOS EN UN SISTEMA DE CONTROL	36
2.5.2.	SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO.....	37
2.5.3.	SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO	38
2.6.	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES.....	39
2.6.1.	CLASES DE PLC	40
2.7.	VARIADOR DE VELOCIDAD (ABB, s.f.).....	43
2.8.	MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL	45
2.8.1.	MEDIDORES VOLUMÉTRICOS	45
2.9.	ACTUADORES	49
2.9.1.	VÁLVULAS DE CONTROL	49
2.9.2.	BOMBAS	50
2.10.	SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN DEL PLC	53
2.10.1.	UNITY PRO	53
2.11.	SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN DEL HMI	54
2.11.1.	VIJEO DESIGNER.....	54
DISEÑO DEL SISTEMA.....		56
CAPÍTULO III.....		56
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	57
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	57
3.3.	DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA.....	57
3.4.	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	58

3.5.	DIAGRAMA P&ID	58
3.6.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.....	59
3.7.	DIAGRAMA DE FUERZA DEL SISTEMA	59
3.8.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA	60
3.9.	IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL Y MONITOREO	61
3.10.	SELECCIÓN DE EQUIPOS	63
3.10.1.	ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN	63
3.10.2.	ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	64
3.10.3.	MODULO COM ETHERNET MB/TCP P/ATV32	68
3.10.4.	ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	68
3.10.5.	INTERFAZ HOMBRE MAQUINA	69
3.11.	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	70
3.11.1.	MODO MANUAL	70
3.11.2.	MODO AUTOMÁTICO	70
3.12.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO	70
3.13.	PROGRAMA PARA PLC, EN LENGUAJE LADDER	76
3.13.1.	DIRECCIONAMIENTO DE VARIABLES EN EL PLC	76
3.13.2.	DIMENSIONAMIENTO DEL BASTIDOR.....	76
3.13.3.	CONFIGURACIÓN RED ETHERNET PLC	77
3.13.4.	VARIABLES EN EL SOFTWARE DEL PLC	77
3.13.5.	PROGRAMA PARA PLC	78
3.13.6.	CONFIGURACIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA.....	81
3.13.6.2.	CONFIGURACIÓN DEL ATV32	83
3.14.	PANEL HMI	85
3.15.	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MÓDULO	88
3.16.	SIMULACION	91
3.17.	PRESUPUESTO	92
3.17.1.	COSTOS DE HARDWARE.....	92

3.17.2. COSTOS DE SOFTWARE.....	92
3.17.3. COSTOS TOTALES.....	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
CAPÍTULO IV	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción Local Box.....	57
Tabla 2: Señales de control y monitoreo.	61
Tabla 3: Medidas experimentales de caudal	70
Tabla 4: Direccionamiento de variables en el PLC.	76
Tabla 5: Costos de Hardware.	92
Tabla 6: Costos de Software.....	92
Tabla 7: Costos totales.	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.	24
Figura 2: Moléculas de un líquido.....	25
Figura 3: Moléculas de un gas.	25
Figura 4: Comportamiento de un fluido.	26
Figura 5: Dos capas de fluido con dx y dv	27
Figura 6: a) Flujo principal b) Remolinos c) Flujo turbulento.....	31
Figura 7: Flujo viscoso dentro de una tubería de radio R y longitud L	34
Figura 8: Capa de fluido comprendida entre r y $r+dr$	34
Figura 9: Perfil de velocidades.....	35
Figura 10: Sistema de Control de lazo abierto.	38
Figura 11: Sistema de control en lazo cerrado.	39
Figura 12: PLC compacto M221.....	40
Figura 13: PLC Modular.	41
Figura 14: PLC Compacto – Modular.....	42
Figura 15: Convertir CA entrante en CC.....	43
Figura 16: Suavizar la onda DC.	44
Figura 17: Convertir la CC a la variable de CA.	44
Figura 18: Calcular y repetir.	44
Figura 19: Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador.....	47
Figura 20: Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.	48
Figura 21: Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.....	48
Figura 22: Bomba centrífuga.	51
Figura 23: Logo Unity Pro XL.....	54
Figura 24: Diagrama P&ID.....	59
Figura 25: Diagrama de bloques del sistema.....	59
Figura 26: Circuito de Fuerza.	60
Figura 27: Diagrama de flujo del sistema.....	61
Figura 28: Sensor de caudal Rotativo DRH-Z3.....	63
Figura 29: PLC Modicon BMXP342020.	64
Figura 30: Módulo de entradas y salidas analógicas BMXAMM0600.....	65

Figura 31: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K.....	66
Figura 32: Variador de Frecuencia ATV32HU15N4.	67
Figura 33: Modulo VW3A3616.	68
Figura 34: Electrobomba Pentax CST 150/2.....	68
Figura 35: HMISTU855.....	69
Figura 36: Programa Matlab.	72
Figura 37: Programa Matlab.	72
Figura 38: Programa Matlab.	73
Figura 39: Programa Matlab.	73
Figura 40: Programa Matlab.	74
Figura 41: Función de Transferencia.....	74
Figura 42: pidtool Matlab.	75
Figura 43: Constantes PID Matlab.	75
Figura 44: Bastidor.	76
Figura 45: Ethernet PLC.	77
Figura 46: Variables PLC.	77
Figura 47: Programa PLC.	78
Figura 48: Programa PLC.	78
Figura 49: Programa PLC.	79
Figura 50: Programa PLC.	79
Figura 51: Programa PLC.	80
Figura 52: Programa PLC	80
Figura 53: Programa PLC.	81
Figura 54: Conexión con el ATV32 desde el Unity Pro XL.....	81
Figura 55: Cargar datos del ATV32.....	81
Figura 56: Pantalla de advertencia.	82
Figura 57: Menú de configuración del ATV32 desde Unity Pro XL.....	82
Figura 58: Menú de configuración de ATV32.	83
Figura 59: Ajustes.....	83
Figura 60: Configuración de parámetros del ATV32.	84
Figura 61: Habilitar Modbus TCP.....	84
Figura 62: Parámetros de lectura y escritura.	84
Figura 63: Habilidad del Explorador de E/S.	84
Figura 64: Configuración IP del máster.	85
Figura 65: Configuración HMI en Vijeo Designer.....	85
Figura 66: Configuración HMI en Vijeo Designer.....	86
Figura 67: Configuración Comunicación PLC-HMI.....	86

Figura 68: Carátula HMI.....	87
Figura 69: Panel principal HMI	87
Figura 70: Panel control HMI.	88
Figura 71: Vista lateral.....	88
Figura 72: Vista frontal.	89
Figura 73: Vista lateral.....	90
Figura 74: Simulación del sistema.	91
Figura 75: Simulación del sistema.	91

RESUMEN

El presente proyecto de tesis tuvo como objetivo principal diseñar y simular una mini planta industrial de un sistema de control de caudal para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

El diseño del sistema remoto, se realizó desarrollo un programa secuencial de Diagrama de Escalera (LADDER) en un PLC Modicon BMXP342020, donde manejamos 3 Variables de Entradas Discretas, 2 entradas analógica, 4 Variables de Salida discreta. 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 remoto hará que la electrobomba impulse agua al caudal correspondiente de acuerdo con el largo de tubería y disposición de los aparatos sanitarios y en modo local la velocidad de la bomba variara proporcional al giro del potenciómetro.

Se concluye; que el diseño y simulación de una mini planta industrial de un sistema de control de caudal 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 UNPRG.

ABSTRACT

The main objective of this thesis project was design and simulation in a mini industrial plant of a flow control system for the training of the students of the professional school of electronic engineering of the UNPRG.

The design of the remote system, the sequential program of Ladder Diagram (LADDER) is developed in a Modicon BMXP342020 PLC, where 3 Discrete Input Variables, 2 Analog inputs, 4 Discrete Output Variables. The communication of the PLC with the ABB ACS 310 variable speed drive is the medium of its analog ports, the system is activated from a local control panel. The speed of the pump will vary proportional to the rotation of the potentiometer.

It concludes; The design and simulation of a mini industrial plant a flow control system serves to demonstrate the competences acquired in the area of automation and control by the students of the Professional School of Electronic Engineering of the UNPRG.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como finalidad diseñar y simular una mini planta industrial de un sistema de control de caudal 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 control de caudal, 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. A su vez observamos la simulación del sistema por medio del programa LabVIEW para así poder observar el correcto funcionamiento del sistema.

En el Capítulo IV: 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 control de caudal.

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

1.1. INFORMACIÓN GENERAL

- **Título**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MINI PLANTA INDUSTRIAL DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL PARA LA CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNPRG

- **Autor**

- Vasquez Velasco Heyser Abel.

Bachiller de Ingeniería Electrónica.

- Jordan Cuña Martin Michael.

Bachiller de Ingeniería Electrónica.

- **Asesor de Especialidad**

Ing. Romero Cortez Oscar Ucchelly.

- **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**

En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, en la carrera de Ingeniería Electrónica actualmente existe la necesidad de implementar mini plantas industriales para el desarrollo de prácticas en medición y control, donde se pueda analizar el comportamiento de distintas variables industriales; en la escuela se cuenta con mini plantas de presión, temperatura y nivel, por lo cual en el presente trabajo de investigación se propone una mini planta de caudal para el estudio de otra variable muy usada en el ámbito industrial con el propósito que todos los estudiantes puedan conocer mediante la manipulación y control de esta variable.

Se debe mencionar que el diseño de este módulo se realizará con elementos de nueva tecnología que pueda simular a lo industrial, lo que es de gran ayuda para mejorar los conocimientos y formación de los estudiantes.

Con los conocimientos adquiridos en los cursos de sistemas de control industrial se obtendrá una visión en procesos que existen actualmente en muchas empresas, y que las mismas tienen sistemas eficientes aplicando instrumentos que son necesarios para su correcto funcionamiento.

- **Formulación del problema de investigación**

¿Cómo diseñar y simular una mini planta industrial de un sistema de control de caudal para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG?

- **Hipótesis**

El diseño y simulación de una mini planta industrial de un sistema de control de caudal servirá para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

- **Objetivos**

Objetivo general

Diseñar y simular una mini planta industrial de un sistema de control de caudal para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.

Objetivos específicos

- Seleccionar adecuadamente los sensores y actuadores.
 - Diseñar el circuito de fuerza del módulo.
 - Determinar el fabricante y equipo de acuerdo con los requerimientos de un sistema de control de caudal.
 - Desarrollar el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID).
 - Plantear el diseño estructural del Módulo.
 - Simular el sistema.
- **Justificación e importancia de la investigación**

Las medidas de caudal tienen una gran importancia dentro de los procesos desarrollados en el mercado industrial, por lo cual requiere que los estudiantes al terminar la universidad cuenten con los conocimientos sobre esta área para lo cual se necesitaría que la enseñanza teórica impartida en aulas sea complementada con prácticas en de laboratorio que aporten una mayor visión de lo aprendido en clase.

El presente proyecto de tesis busca disminuir las limitaciones de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica y capacitar en teoría y práctica para que los estudiantes logren llegar a un nivel óptimo de conocimientos necesarios para desempeñarse en el ámbito industrial.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

- **Antecedentes**

- 1. Antecedentes Nacionales**

- a) Diseño e implementación de un sistema de control automático para el acuario RALFISH en la ciudad de Trujillo***

En el presente trabajo de investigación se centra en realizar el Diseño e Implementación de un Sistema de Control Automático para el Acuario “Ralfish” en la ciudad de Trujillo. En el Primer Capítulo del presente trabajo, se aborda la problemática actual en la tienda de ventas del Acuario “Ralfish” en cuanto al mantenimiento de las condiciones necesarias para el buen funcionamiento de sus acuarios, exponemos nuestro objetivo y damos a conocer la importancia de dar una solución a dicho problema. En el Segundo Capítulo se presenta el marco teórico, en el cual se muestra un sustento valido del porqué la elección de realizar un diseño e implementación de un sistema de control automático, así como también se refuerza las bases teóricas de la solución que se propone. En el Tercer Capítulo se procede con el desarrollo de la solución, se muestra el diseño, la programación desarrollada para el módulo de control, detallamos los equipos, accesorios y programas utilizados para lograr la conectividad del módulo de control y el HMI, así también argumentamos porqué nuestra solución es viable para los acuarios “Ralfish”. (Rubio Quispe & Choton Posadas, 2016)

- 2. Antecedentes Internacionales**

- b) Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico de Control de Caudal para el Laboratorio de Control de la EIE-CRI de la ESPOCH***

En este proyecto se diseña y construye un módulo didáctico de control de caudal para el laboratorio de control de la Escuela Ingeniería Electrónica, Control y Redes Industriales (EIE-CRI) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se aplicó método analítico para determinar ecuaciones o función de transferencia para cada componente del sistema obteniendo la función de transferencia que gobierna la planta. Para medir el caudal de agua se utilizó un sensor tipo turbina marca KOBOLD por su linealidad y exactitud, del orden de $\pm 0.3\%$. Para el control de la planta se utilizó tarjeta de adquisición de datos de NATIONAL INSTRUMENTAL “My DAQ” encargada de realizar la comunicación entre interfaz de control y módulo de caudal de agua. El incremento o descenso del caudal se lo hace variando la velocidad de la bomba trifásica de marca BALDOR, mediante utilización del convertidor de frecuencia ACS350 de ABB. El valor de consigna es ingresado desde una interfaz de comunicación Hombre - Máquina desarrollada en el software LabVIEW 2009, para circulación del fluido se instaló manguera PVC de $\frac{3}{4}$ ", válvula de bola y válvula check, para depositar el agua de la planta se utilizó tanque de vidrio. Los resultados obtenidos en el módulo de caudal demuestran que puede controlar el caudal desde un punto mínimo que es 0.5 galones por minuto (GPM) hasta un punto máximo que es de 5 galones por minuto (GPM), con un error absoluto de 0.1 galones por minuto (GPM), lo que indica que es un sistema bastante confiable, presenta tiempos de respuesta muy rápidos para alcanzar y mantener el punto de consigna deseado, logrando controlar la variable caudal. La construcción del módulo de caudal constituye un importante aporte para el aprendizaje de los estudiantes de Control Industrial. Permite observar la utilización de uno de los diferentes tipos de sensores de caudal que utilizan los procesos industriales, es una herramienta clara de simulación de procesos existentes en la industria. (Darwin, 2012)

c) ***Diseño y construcción de un módulo didáctico para el control de flujo de agua utilizando la variación de velocidad de los motores de las bombas***

El objetivo del presente proyecto fue diseñar y construir un sistema didáctico de control de flujo de agua utilizando variadores de velocidad (VSD) para controlar bombas que impulsan el líquido.

Con este propósito se diseñó una planta compuesta de: dos bombas

centrifugas, dos variadores de velocidad, un PLC, una interfaz HMI, dos tanques, válvulas, tubería e instrumentos.

Pruebas realizadas demostraron que, en el sistema implementado, cada bomba (1 HP) no puede impulsar el líquido con una velocidad inferior a 1200 RPM, que equivale a aplicar una frecuencia de casi 20 Hz al motor de dicha bomba.

Además, se verificó que con una sola bomba se puede llegar a obtener un flujo de aproximadamente 26 GPM, en cambio con la operación de la segunda bomba en paralelo con la primera, se obtuvo un flujo de aproximadamente 35 GPM.

Para finalizar, se evidenció que el flujo varía de forma casi proporcional con la velocidad de la bomba que impulsa dicho flujo; sin embargo, esta afirmación es válida y ha sido corroborada con la ejecución de las pruebas, solo para bombas centrifugas. (Vega Monge, 2012)

1.4. DISEÑO METODOLÓGICO

- **Diseño de contrastación de hipótesis**

Llevando a la práctica los conocimientos adquiridos sobre control de caudal, Sistemas de Control, Automatización Industrial, PLC, Variadores de velocidad, Sensores y Actuadores, se diseñará una mini planta industrial de un sistema de control de caudal que permita a los estudiantes conocer el proceso de control de caudal. 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. FLUIDOS (Soriano, s.f.)

Fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando está sometido a un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de éste, no habrá deformación. De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

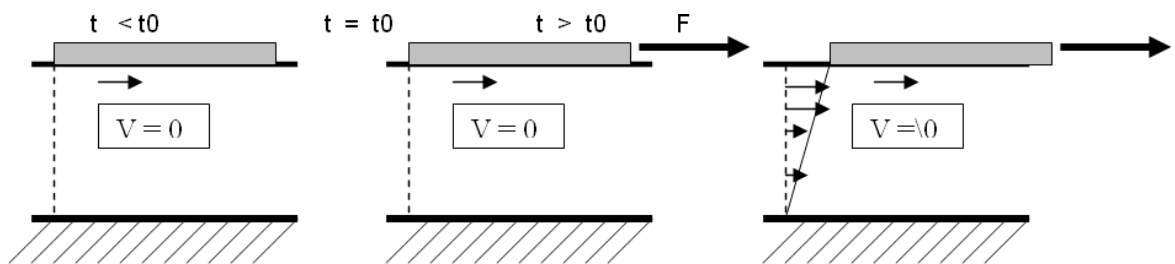


Figura 1: Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que le ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte, se tienen reacciones particulares que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

La materia se nos presenta en muchas fases o estados, todos con propiedades y características diferentes, y aunque los más conocidos y observables cotidianamente son cuatro: Fase Sólida, Fase Líquida, Fase Gaseosa y Fase Plasma; otros estados son observables en condiciones extremas de presión y temperatura.

En física y química se observa que, para cualquier cuerpo o estado material, modificando las condiciones de temperatura y/o presión, pueden obtenerse distintos estados o fases de agregación, denominados estados de agregación de la materia, relacionadas con las fuerzas de unión de las partículas (moléculas, átomos o iones) que constituyen la misma.

En los líquidos, los átomos se encuentran más alejados unos de otros, en comparación con los átomos de un sólido y, por tanto, las fuerzas de cohesión que existen entre ellos son más débiles.

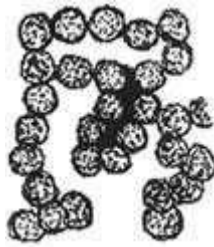


Figura 2: Moléculas de un líquido.

Los gases son muy compresibles, porque son capaces de reducir su volumen cuando se les aplica una fuerza, por lo que se les considera elásticos, mientras que los líquidos son prácticamente incompresibles, puesto que conservan su volumen fijo, siempre que no se altere su temperatura.

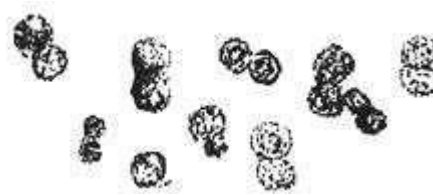


Figura 3: Moléculas de un gas.

2.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS (Soriano, s.f.)

Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento, así como distinguirlos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad, compresibilidad y tensión superficial solo se pueden definir en los líquidos y gases.

2.2.1. DENSIDAD

Se denomina densidad a la relación que existe entre la masa específica de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. para los líquidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1 [g/cm³] y para los gases se utiliza al aire con masa específica a 20°C y 1,013 bar de presión la cual es 1,204 [kg/m³].

2.2.1. GRAVEDAD ESPECIFICA

La gravedad específica o densidad relativa de una sustancia se define como la relación entre la densidad absoluta de la sustancia y la densidad de una sustancia patrón.

$$G.E. = \frac{Densidad.Absoluta}{Densidad.Patrón} = \frac{\rho}{\rho_p}$$

(Ec. 1)

Para líquidos y sólidos, se toma como sustancia patrón el agua

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(Ec. 2)

2.2.2. PESO ESPECÍFICO

El peso específico γ corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por γ . La masa y el peso específico están relacionados por:

$$\gamma = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = \frac{W}{V}$$

(Ec. 3)

Sabiendo que $W = mg$ y que $\rho = m/V$, tenemos que $m = \rho V$

Si sustituimos estos resultados en la ecuación del peso específico tenemos:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

(Ec. 4)

Donde g representa la intensidad del campo gravitacional.

2.2.3. VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además, los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que existe entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

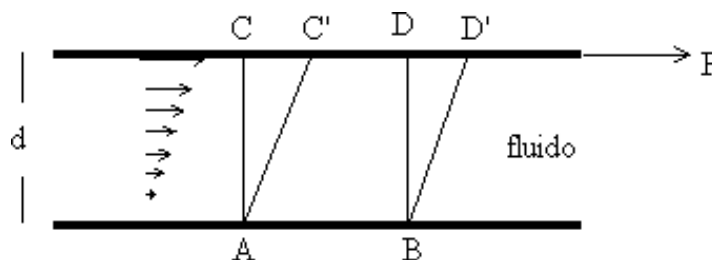


Figura 4: Comportamiento de un fluido.

La capa de fluido en contacto con la lámina móvil tiene la misma velocidad que ella, mientras que la adyacente a la pared fija está en reposo. La velocidad de las distintas capas intermedias aumenta uniformemente entre ambas láminas tal como sugieren las flechas. Un flujo de este tipo se denomina laminar. (Universidad del país vasco, s.f.)

Como consecuencia de este movimiento, una porción de líquido que en un determinado instante tiene la forma ABCD, al cabo de un cierto tiempo se deformará y se transformará en la porción ABC'D'.

Sean dos capas de fluido de área S que distan dx y entre las cuales existe una diferencia de velocidad dv.

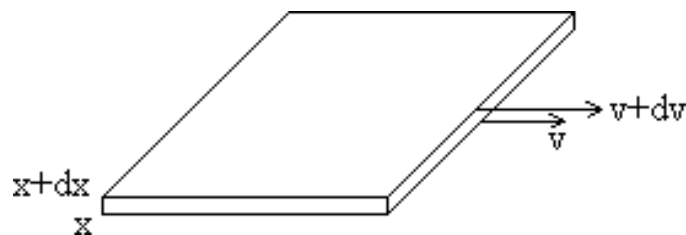


Figura 5: Dos capas de fluido con dx y dv.

La fuerza por unidad de área que hay que aplicar es proporcional al gradiente de velocidad. La constante de proporcionalidad se denomina viscosidad η .

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

(Ec. 5)

En el caso particular, de que la velocidad aumente uniformemente, como se indicó en la Figura 5, la ecuación (1) se escribe

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{d}$$

(Ec. 6)

2.2.4. COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a los que se someten un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa

específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

$$PV = nRT$$

(Ec. 7)

Donde:

P = Presión

V = Volumen

n = Moles de Gas.

R = Constante universal de los gases ideales.

T = Temperatura absoluta

2.2.5. TENSION SUPERFICIAL

Se ha observado que entre la interfase de dos fluidos que no se mezclan se comporta como si fuera una membrana tensa. La tensión superficial es la fuerza que se requiere para mantener en equilibrio una longitud unitaria de esta película. El valor de ella dependerá de los fluidos en contacto y de la temperatura. Los efectos de la tensión superficial solo son apreciables en fenómenos de pequeñas dimensiones, como es el caso de tubos capilares, burbujas, gotas y situaciones similares.

Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales

Propiedad	Designación	Unidades	Valores	
			Agua	Aire
Masa específica	P	kg/m ³	1.000	1,2
Viscosidad	β	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	Cp	J/kg°K	4.200	1.008
Presión de vapor	Pv	bar	0,023	-
(20°)	Ö	mN/m	72,8	-

Tensión Superficial				
---------------------	--	--	--	--

Sin embargo, la masa específica, el peso específico y la densidad son atributos de cualquier materia.

2.2.6. MASA ESPECÍFICA

Se denomina masa específica a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por P y se define:

$$P = \lim_{v \rightarrow 0} \left(\frac{m}{v} \right) \quad (\text{Soriano, s.f.})$$

(Ec. 8)

2.3. ANÁLISIS PUNTUAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS FLUIDOS (Soriano, s.f.)

En opinión del autor Fernández Larrañaga: “El análisis puntual está orientado a establecer un modelo matemático del comportamiento del fluido, lo que permita conocer a detalle lo que ocurre en cada punto, para ello se establece ecuaciones básicas. Con base en ello se podrá conocer la distribución espacial y temporal de las variables que definen el comportamiento del fluido, como son la presión, velocidad, masa específica entre otras”.

El análisis requiere mayor esfuerzo, pero entrega más información sobre el comportamiento del fluido.

2.3.1. EL TEOREMA DE BERNOULLI

Una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos es el teorema de Bernoulli, que relaciona un aumento en la velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa. El teorema de Bernoulli explica, por ejemplo, la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión en vuelo. Un ala —o plano aerodinámico— está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre la superficie superior que sobre la inferior, lo que provoca una disminución de presión en la superficie de arriba con respecto a la de abajo. Esta diferencia de presiones proporciona la fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo.

2.3.2. FLUJOS VISCOSOS: MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO

Los primeros experimentos cuidadosamente documentados del rozamiento en flujos de baja velocidad a través de tuberías fueron realizados independientemente en 1839 por el fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre y en 1840 por el ingeniero hidráulico alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones matemáticas se debió al ingeniero francés Claude Louis Marie Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Gabriel Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, y son tan complejas que sólo se pueden aplicar a flujos sencillos. Uno de ellos es el de un fluido real que circula a través de una tubería recta. El teorema de Bernoulli no se puede aplicar aquí, porque parte de la energía mecánica total se disipa como consecuencia del rozamiento viscoso, lo que provoca una caída de presión a lo largo de la tubería.

Las ecuaciones sugieren que, dados una tubería y un fluido determinados, ésta caída de presión debería ser proporcional a la velocidad de flujo. Los experimentos realizados por primera vez a mediados del siglo XIX demostraron que esto sólo era cierto para velocidades bajas; para velocidades mayores, la caída de presión era más bien proporcional al cuadrado de la velocidad.

Este problema no se resolvió hasta 1883, cuando el ingeniero británico Osborne Reynolds demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías. A velocidades bajas, las partículas del fluido siguen las líneas de corriente (flujo laminar), y los resultados experimentales coinciden con las predicciones analíticas. A velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones en la velocidad del flujo, o remolinos (flujo turbulento), en una forma que ni siquiera en la actualidad se puede predecir completamente. Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds.

Si el número de Reynolds que carece de dimensiones es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido es menor de 2.100, el flujo a través de la tubería es siempre laminar; cuando

los valores son más elevados suele ser turbulento. El concepto de número de Reynolds es esencial para gran parte de la moderna mecánica de fluidos.

Según James A. Fay: “Los flujos turbulentos no se pueden evaluar exclusivamente a partir de las predicciones calculadas, y su análisis depende de una combinación de datos experimentales y modelos matemáticos”. Gran parte de la investigación moderna en mecánica de fluidos está dedicada a una mejor formulación de la turbulencia. Puede observarse la transición del flujo laminar al turbulento y la complejidad del flujo turbulento cuando el humo de un cigarrillo asciende en aire muy tranquilo. Al principio, sube con un movimiento laminar a lo largo de líneas de corriente, pero al cabo de cierta distancia se hace inestable y se forma un sistema de remolinos entrelazados.

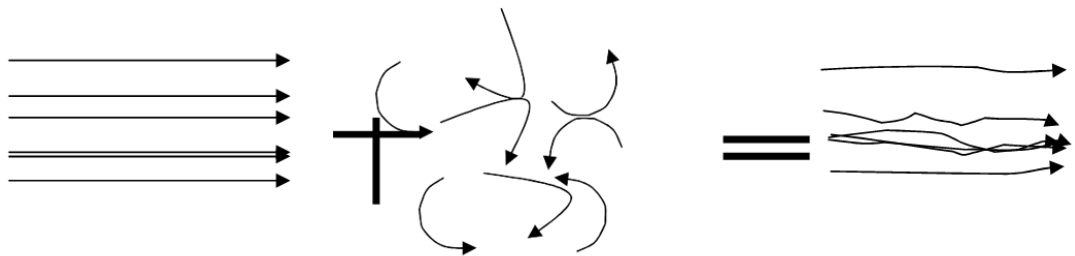


Figura 6: a) Flujo principal b) Remolinos c) Flujo turbulento.

2.3.3. NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluido, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. Así por ejemplo en conductos si el número de Reynolds es menor de 2000 el flujo será laminar y si es mayor de 4000 el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación.

- Para valores del flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan solo en base a esfuerzos tangenciales, por eso a este flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.
- Para valores de la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.
- Para valores de, después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento; es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), el mismo viene dado por siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

(Ec. 9)

$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

(Ec. 10)

Donde:

ρ : densidad del fluido

v_s : velocidad característica del fluido

D : Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido

μ : viscosidad dinámica del fluido

ν : viscosidad cinemática del fluido

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

(Ec. 11)

2.3.4. FLUJOS COMPRESIBLES

El interés por los flujos compresibles comenzó con el desarrollo de las turbinas de vapor por el inventor británico Charles Algernon Parsons y el ingeniero sueco Carl Gustaf Patrik de Laval durante la década de 1880. En esos mecanismos se descubrió por primera vez el flujo rápido de vapor a través de tubos, y la necesidad de un diseño eficiente de turbinas llevó a una mejora del análisis de los flujos compresibles.

Pero los avances modernos tuvieron que esperar al estímulo que supuso el desarrollo de la turbina de combustión y la propulsión a chorro en la década de 1930. El interés por los flujos de alta velocidad sobre superficies surgió de forma temprana en los estudios de balística, donde se necesitaba comprender el movimiento de los proyectiles. Los avances más importantes comenzaron hacia el final del siglo XIX, con Prandtl y sus discípulos, entre otros, y crecieron con la introducción de los aviones de alta velocidad y los cohetes en la II Guerra Mundial.

Uno de los principios básicos del flujo compresible es que la densidad de un gas cambia cuando el gas se ve sometido a grandes cambios de velocidad y presión. Al mismo tiempo, su temperatura también cambia, lo que lleva a problemas de análisis más complejos.

El comportamiento del flujo de un gas compresible depende de si la velocidad de flujo es mayor o menor que la velocidad del sonido. El sonido es la propagación de una pequeña perturbación, u onda de presión, dentro de un fluido. Para un gas, la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta. La velocidad del sonido en el aire a 20 °C es de unos 344 metros por segundo. Si la velocidad de flujo es menor que la velocidad del sonido (flujo subsónico), las ondas de presión pueden transmitirse a través de todo el fluido y así adaptar el flujo que se dirige hacia un objeto. Por tanto, el flujo subsónico que se dirige hacia el ala de un avión se ajustará con cierta distancia de antelación para fluir suavemente sobre la superficie. En el flujo supersónico, las ondas de presión no pueden viajar corriente arriba para adaptar el flujo. Por ello, el aire que se dirige hacia el ala de un avión en vuelo supersónico no está preparado para la perturbación que va a causar el ala y tiene que cambiar de dirección repentinamente en la proximidad del ala, lo que conlleva una compresión intensa u onda de choque. El ruido asociado con el paso de esta onda de choque sobre los observadores situados en tierra constituye el estampido sónico de los aviones supersónicos. Frecuentemente se identifican los flujos

supersónicos por su número de Mach, que es el cociente entre la velocidad de flujo y la velocidad del sonido. Por tanto, los flujos supersónicos tienen un número de Mach superior a 1. (Soriano, s.f.)

2.3.5. LEY DE POISEUILLE

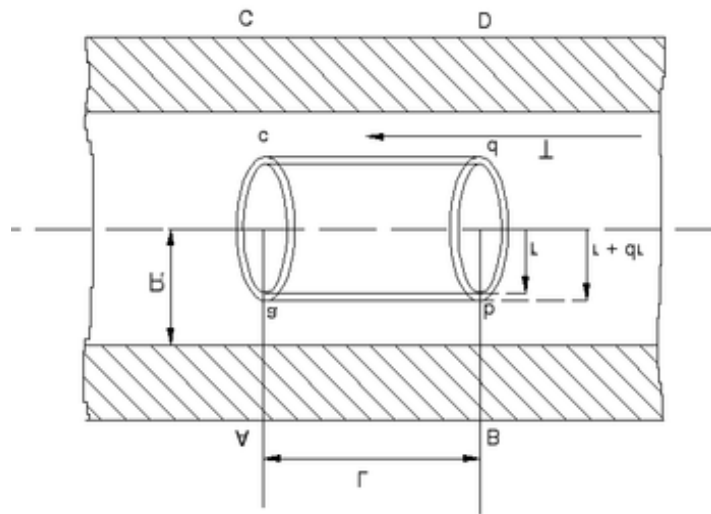


Figura 7: Flujo viscoso dentro de una tubería de radio R y longitud L.

Se considera ahora un fluido viscoso que circula en régimen laminar por una tubería de radio interior R, y de longitud L, bajo la acción de una fuerza debida a la diferencia de presión existente en los extremos del tubo.

Entonces:

$$F = (p_1 - p_2) \pi r^2 \quad (\text{Ec. 1.9})$$

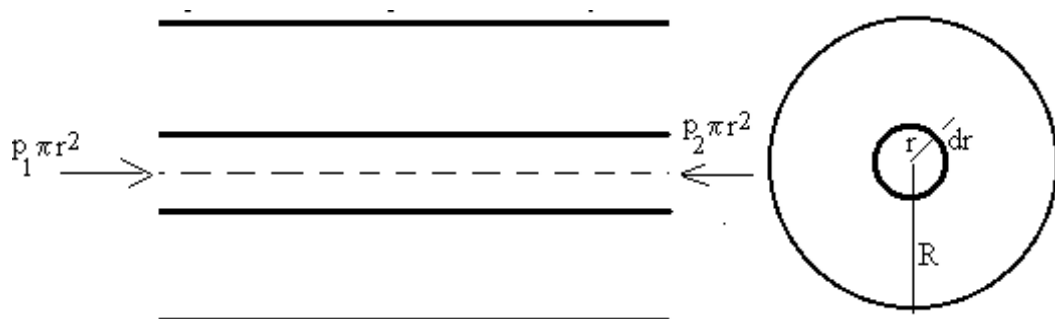


Figura 8: Capa de fluido comprendida entre r y r+dr.

Sustituyendo F en la fórmula (1) y teniendo en cuenta que el área A de la capa es ahora el área lateral de un cilindro de longitud L y radio r.

$$\frac{(p_1 - p_2) \pi r^2}{2 \pi r L} = -\eta \frac{dv}{dr}$$

(Ec. 12)

El signo negativo se debe a que v disminuye al aumentar r . (Universidad del país vasco, s.f.)

2.3.6. PERFIL DE VELOCIDADES

Integrando esta ecuación, se obtiene el perfil de velocidades en función de la distancia radial, al eje del tubo. Se ha de tener en cuenta que la velocidad en las paredes del tubo $r=R$ es nula.

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$

(Ec. 13)

Que es la ecuación de una parábola.

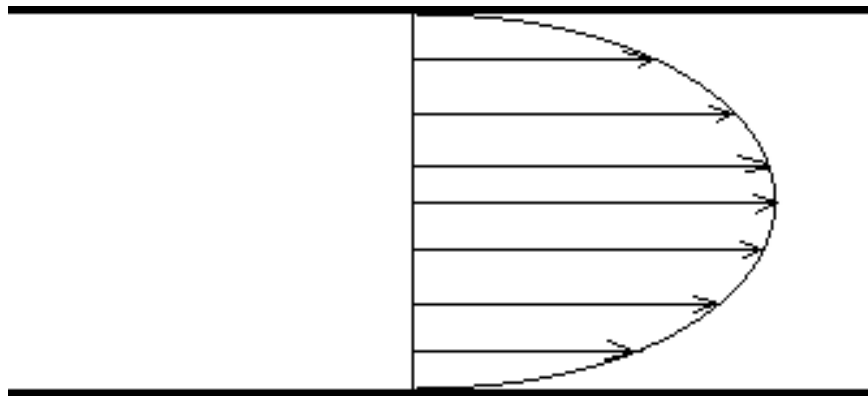


Figura 9: Perfil de velocidades.

El flujo tiene por tanto un perfil de velocidades parabólico, siendo la velocidad máxima en el centro del tubo. (Universidad del país vasco, s.f.)

2.4. AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

La automatización industrial es el uso de sistemas de control, como máquinas o robots, y tecnologías de la información (TIC) para manejar diferentes procesos y maquinarias en una industria para reemplazar a un ser humano. Es el segundo paso más allá de la mecanización en el ámbito de la industrialización.

Anteriormente, el objetivo de la automatización era aumentar la productividad (ya que los sistemas automatizados pueden funcionar las 24 horas del día) y reducir el costo asociado con los operadores humanos (es decir, salarios y beneficios). Sin embargo, hoy en día, el enfoque de la automatización se ha desplazado hacia el aumento de la calidad y la flexibilidad en un proceso de fabricación. En la industria del automóvil, la instalación de pistones en el motor solía realizarse manualmente con una tasa de error de 1-1,5%. En la actualidad, esta tarea se realiza utilizando maquinaria automatizada con una tasa de error de 0.00001%. (IDboxRT, 2018)

2.5. 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)

2.5.1. 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)

2.5.2. 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 10 se pueden observar las señales involucradas en un control en lazo abierto.

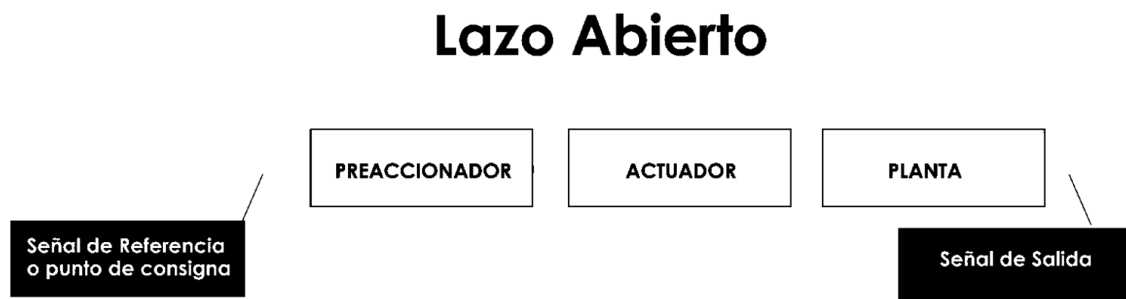


Figura 10: Sistema de Control de lazo abierto.

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)

2.5.3. 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 11 aparece representado un esquema típico de un sistema controlado en lazo cerrado.

Lazo Cerrado

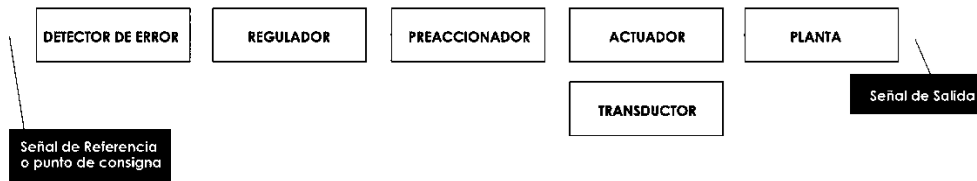


Figura 11: Sistema de control en lazo cerrado.

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)

2.6. 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)

2.6.1. CLASES DE PLC

2.6.1.1. PLC COMPACTO

Un PLC compacto es un controlador que su configuración inicial no puede ser modificada en el tiempo debido a que todos sus componentes están integrados en el equipo.

Ventajas de un PLC Compacto:

- Usualmente su programación al no tener mayores variables internas (no tiene opciones de tener mayores prestaciones que las que se indican) su programación eventualmente es más simple que la de un PLC Modular.

Este PLC debido a sus restricciones, puede ser la opción más económica para un requerimiento en particular.

Desventajas de un PLC Compacto:

- Al no tener posibilidad de ampliar sus capacidades, restringe mucho sus aplicaciones en requerimientos que su crecimiento sea exponencial en el tiempo. (Fox, 2017)



Figura 12: PLC compacto M221.

2.6.1.2. PLC MODULAR

Un PLC modular es un controlador que tiene la posibilidad de ampliarse en el tiempo, esto es debido a que se pueden agregar más módulos a su configuración inicial.

En este caso y de forma genérica lo más usual es que se requiera lo siguiente:

- Módulo de CPU

- Módulo de fuente de energía
- Módulo de comunicaciones
- Módulo de entradas analógicas
- Módulo de entradas digitales
- Módulo de salidas analógicas

Ventajas de un PLC Modular:

- Este tipo de PLC permite poder escalar su capacidad, una buena solución para procesos que se tenga pensado en el tiempo aumentar su complejidad en el tiempo.

Desventaja de un PLC Modular:

- Generalmente su precio en el mercado es mayor a la de un PLC compacto, pero esta desventaja eventualmente se compensa con su adaptabilidad al crecimiento del proceso en el cual está inserto.
- Debido a su flexibilidad en su configuración su programación en algunas ocasiones es más compleja que un PLC compacto. (Fox, 2017)

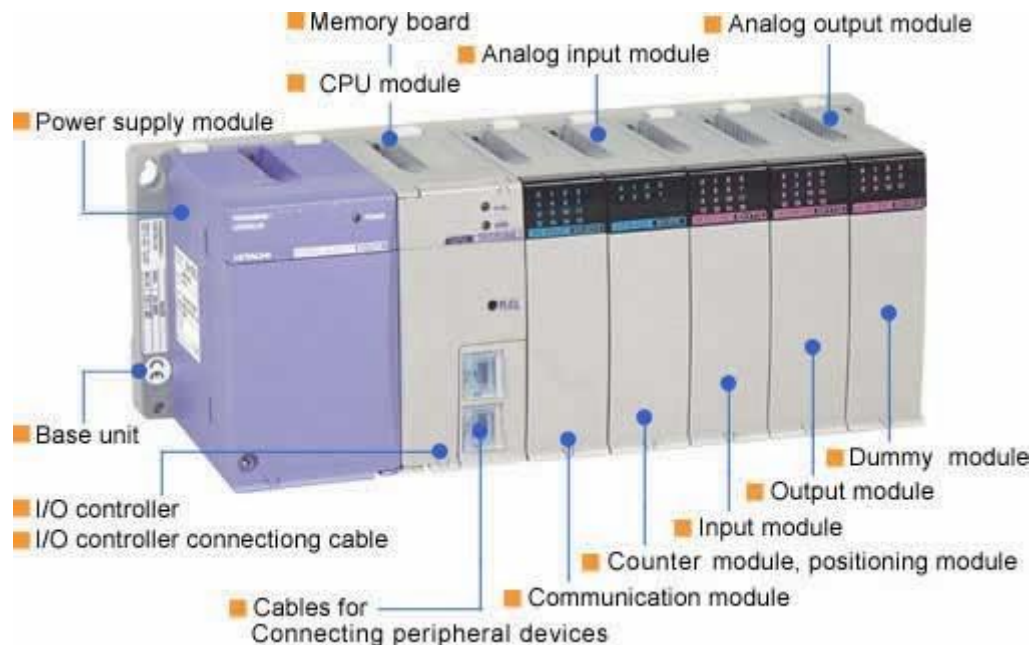


Figura 13: PLC Modular.

2.6.1.3. 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)

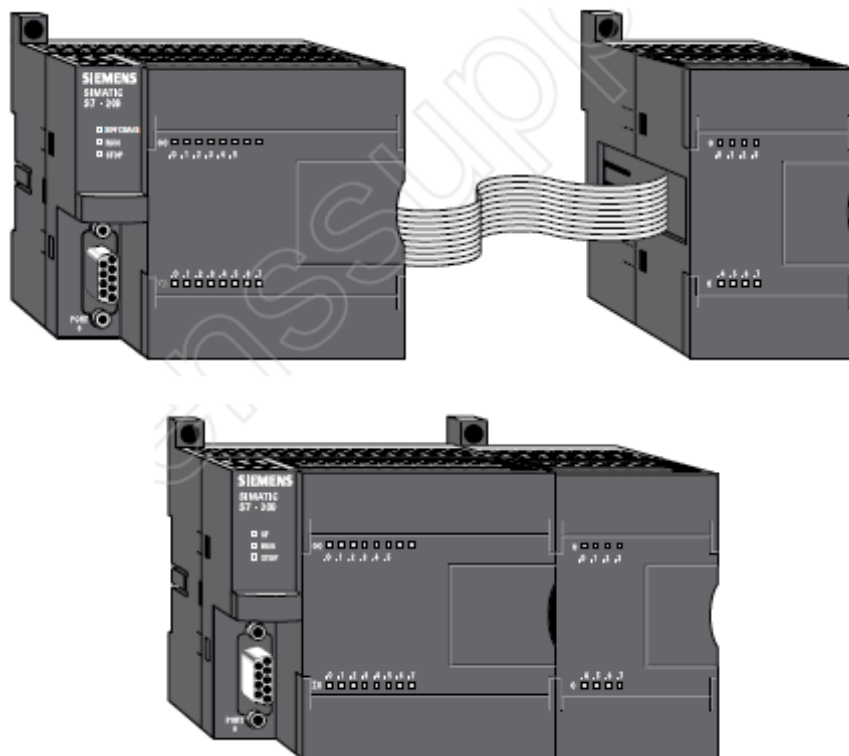


Figura 14: PLC Compacto – Modular.

2.7. 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%.

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.

a) Convertir CA entrante en CC.

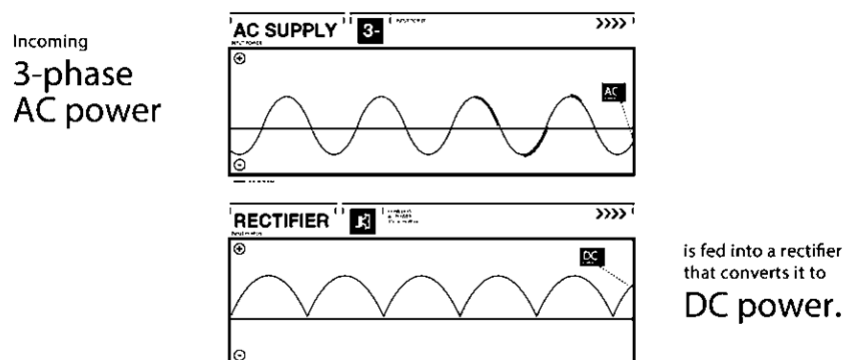


Figura 15: Convertir CA entrante en CC.

b) Suavizar la onda DC

DC power is fed into capacitors, smoothing the wave and producing a clean DC supply.

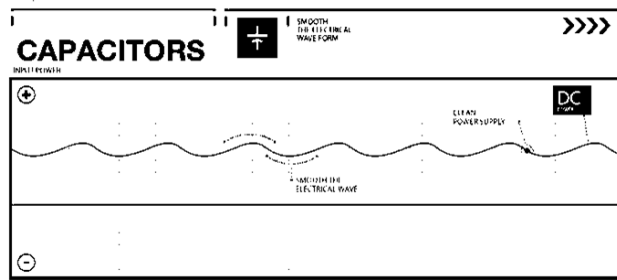
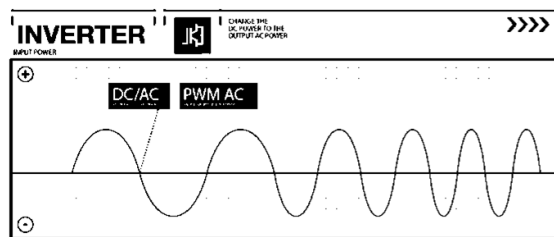


Figura 16: Suavizar la onda DC.

c) Convertir la CC a la variable de CA



The drive calculates the motor's required voltage and current. DC power is then fed into an inverter producing AC power at the precise voltage and current needed.

Figura 17: 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.

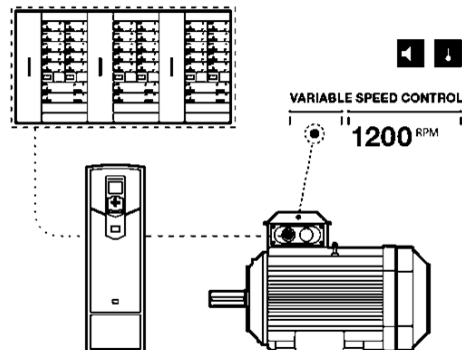


Figura 18: Calcular y repetir.

2.8. MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL

La selección eficaz de un medidor de caudal exige un conocimiento práctico de la tecnología del medidor, además de un profundo conocimiento del proceso y del fluido que se quiere medir.

Cuando la medida del caudal se utiliza con el propósito de facturar un consumo, deberá ser lo más precisa posible, teniendo en cuenta el valor económico del fluido que pasa a través del medidor, y la legislación obligatoria aplicable en cada caso.

2.8.1. MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

2.8.1.1. MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

La medida de caudal en conducciones cerradas consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por el conducto por unidad de tiempo. Los instrumentos que llevan a cabo la medida de un caudal se denominan, habitualmente, caudalímetros o medidores de caudal, constituyendo una modalidad particular los contadores, los cuales integran dispositivos adecuados para medir y justificar el volumen que ha circulado por la conducción.

Los medidores de caudal volumétrico pueden determinar el caudal de volumen de fluido de dos formas:

- Directamente, mediante dispositivos de desplazamiento positivo, o
- Indirectamente, mediante dispositivos de: presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, etc.

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Esta clase de medidores presenta una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

Principales medidores de presión diferencial

Entre los principales tipos de medidores de presión diferencial se pueden destacar los siguientes:

- Placas de orificio
- Toberas
- Tubos Venturi
- Tubos Pitot
- Tubos Annubar

Se estima que, actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular el de placa orificio.

Las principales ventajas de dichos medidores son:

Su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles, su funcionamiento se comprende con facilidad, no son caros, particularmente si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores.

Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos, y hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos.

Sus principales desventajas son:

La amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores, pueden producir pérdidas de carga significativas, la señal de salida no es lineal con el caudal, deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes, pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas, la precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar. (A. Ballester, J.A. Fernandez, & J.A. López Geta, 199)

2.8.1.2. MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE

Los medidores de área variable funcionan sobre la base de mantener una presión diferencial constante, permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal. Existen varios tipos de medidores de orificio variable, pero el más utilizado es el que está formado por un tubo cónico de eje vertical y un flotador. Como se muestra en la Figura 19, el fluido circula en sentido ascendente por el tubo desplazando un flotador

que, habitualmente, lleva unas ranuras que dan lugar a que el flotador gire, proporcionándole la estabilidad y efecto de centrado necesario. Esta rotación es la que ha dado origen al nombre de rotámetro.

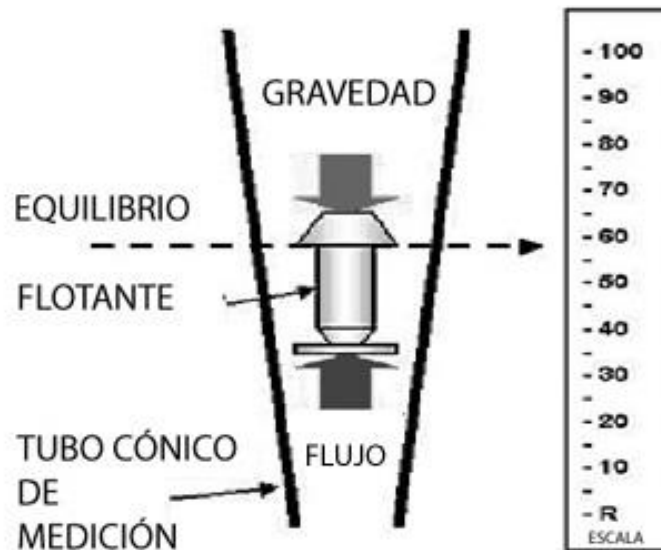


Figura 19: Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador.

Cuando no hay flujo el flotador descansa en la parte baja del tubo, pero al pasar el fluido hace ascender el flotador de su posición de reposo, a fin de mantener la caída de presión a través del flotador en equilibrio con los efectos de empuje hidrostático y gravitatorio que actúan sobre el mismo. Puesto que el peso del flotador sumergido es una constante para un fluido dado, la caída de presión también tiene que permanecer constante. Por consiguiente, cuando el caudal aumenta, el flotador ascenderá en el tubo con el fin de proporcionar una sección anular de paso mayor, para que el fluido pueda pasar a través de ella.

La altura que alcanza el flotador es así una indicación del caudal que está pasando y, en el caso de tratarse de un tubo transparente, puede graduarse directamente sobre el tubo en unidades de caudal. Cuando las condiciones de trabajo son más severas, el tubo se fabrica de metal.

La precisión que puede conseguirse con los medidores de área variable no suele ser mejor que $\pm 2\%$ de desviación a plena escala, por lo que no son aconsejables cuando se requiere una elevada precisión. (A. Ballester, J.A. Fernandez, & J.A. López Geta, 199)

2.8.1.3. MEDIDOR DE TURBINA

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La Figura 20 muestra la sección transversal de un medidor de turbina típico para líquidos. Consta de una longitud de tubería en el centro de la cual hay un rotor de paletas múltiple, montado sobre cojinetes, para que pueda girar con facilidad, y soportado aguas arriba y aguas abajo por un dispositivo de centrado tipo cruceta que, habitualmente, incorpora un enderezador de la vena fluida. La energía cinética del fluido circulando hace girar el rotor con una velocidad angular que, en el margen lineal del medidor, es proporcional a la velocidad media axial del fluido y, por tanto, al caudal volumétrico.

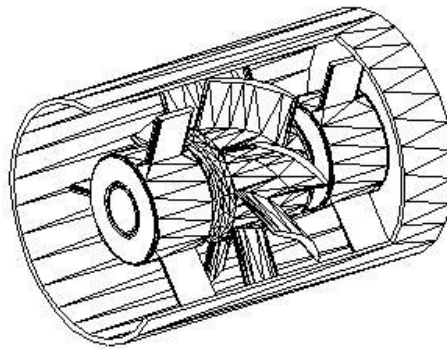


Figura 20: Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos. Una teoría sencilla sobre el funcionamiento de los medidores de turbina puede comprenderse mediante la Figura 21, que muestra un diagrama simplificado de la velocidad para una paleta de un medidor ideal.

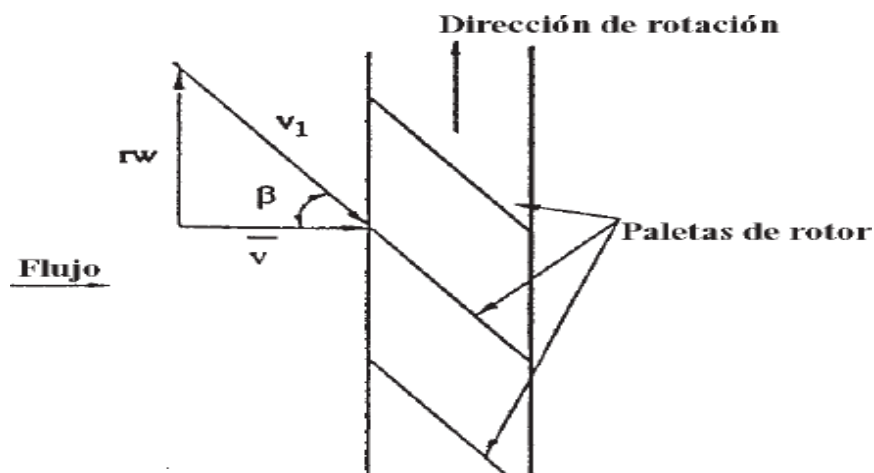


Figura 21: Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.

Los medidores de turbina para gas o líquido difieren fundamentalmente en el diseño del rotor.

Una salida mediante impulsos eléctricos se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor. El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor. (A. Ballester, J.A. Fernandez, & J.A. López Geta, 199)

2.9. 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.)

2.9.1. 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”.

Existen muchos tipos de válvulas para diferentes aplicaciones.

2.9.1.1. 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)

2.9.1.2. 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)

Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión final, presión de proceso, velocidad de bombeo, tipo de fluidos a bombear (la eficiencia de cada bomba varía según el tipo de fluido).

2.9.2. BOMBAS

2.9.2.1. CLASIFICACIÓN

Según el principio de funcionamiento

La principal clasificación de las bombas se realiza atendiendo al principio de funcionamiento en el que se basan:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico.
- Bombas rotodinámicas

2.9.2.1.1. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO O VOLUMÉTRICO

Su principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas.

En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

- Bombas de émbolo alternativo, son las que poseen uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que

abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.

- Bombas volumétricas rotativas o roto estáticas, son aquellas en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son
 - La bomba de paletas, La bomba de lóbulos
 - La bomba de engranajes
 - La bomba de tornillo o bomba peristáltica

2.9.2.1.2. BOMBAS ROTODINÁMICAS

Su principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbomáquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- Radiales o centrífugas, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.
- Axiales, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.
- Diagonales o helicocentrífugas cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

2.9.2.1.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS.

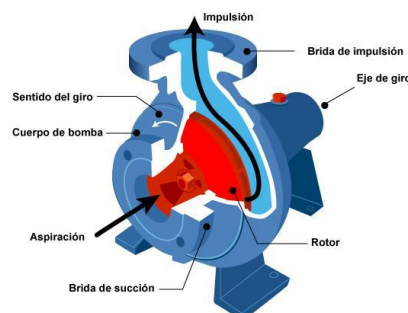


Figura 22: Bomba centrífuga.

Son el tipo más corriente de bombas centrífugas, y se denomina así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga.

Pueden impulsar caudales tan pequeños como 1 gal/min. o tan grandes como 4.000.000 gal/min, mientras que la cota generada puede variar desde algunos pies hasta 400. El rendimiento de las de mayor tamaño puede llegar al 90%.

El montaje es generalmente horizontal, ya que así se facilita el acceso para el entretenimiento. Sin embargo, debido a la limitación del espacio, algunas unidades de gran tamaño se montan verticalmente.

Las proporciones de los rodets varían dentro de un campo muy amplio, lo que permite hacer frente a una dilatada gama de condiciones de funcionamiento.

Por ejemplo, los líquidos con sólidos en suspensión (aguas residuales) pueden ser bombeados siempre que los conductos sean suficientemente amplios. Inevitablemente habrá alguna disminución de rendimiento.

Para que la bomba centrífuga esté en disposición de funcionar satisfactoriamente, tanto la tubería de aspiración como la bomba misma, han de estar llenas de agua. Si la bomba se encuentra a un nivel inferior a la del agua del pozo de aspiración, siempre se cumplirá esta condición, pero en los demás casos hay que expulsar el aire de la tubería de aspiración y de la bomba y reemplazarlo por agua; esta operación se denomina cebado.

El mero giro del rodete, aún a alta velocidad, resulta completamente insuficiente para efectuar el cebado y sólo se conseguirá recalentar los cojinetes.

Las aplicaciones de esta bomba son de óptimo rendimiento en PLANTAS DE ACIDO, AGUA DE COLA, AGUAS MARINAS, y en general en lugares con gran concentración de CORROSIVOS. Además, tiene una muy buena aplicación en la INDUSTRIA ALIMENTICIA dado que no contamina los productos.

Las bombas están disponibles en materiales del acero termoplástico e inoxidable, diseños del mecanismo impulsor para las aplicaciones horizontales y verticales.

La construcción rugosa proporciona una resistencia excelente al producto químico y a la corrosión.

Las aplicaciones típicas son proceso químico, laminado de metal, piezas que lavan sistemas, fabricación de la tarjeta de circuito impresa, foto que procesa, productos farmacéuticos, semiconductores, etc.

2.10. SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN DEL PLC

2.10.1. 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 23: Logo Unity Pro XL.

2.11. SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN DEL HMI

2.11.1. VIJEIO 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.

DISEÑO DEL SISTEMA

CAPÍTULO III

3.1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se describirá el funcionamiento de nuestro sistema de control de un sistema de caudal 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, el panel HMI y un variador de velocidad.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En el siguiente proyecto se utilizará para el control de un sistema de caudal con un sensor de caudal tipo Rotativo DRH-Z3, un PLC M340, un HMI MAGELIS STU de la Marca SHNEIDER ELECTRIC, un variador de velocidad; 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 caudal.
- Control de Variador de velocidad
- Control manual de las válvulas de salida de agua.

3.3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA

El sistema cuenta con un sensor de caudal, PLC M340, un módulo de e/s analógicas, un HMI STU 855, un LCB (Local Control Box), un variador de velocidad, 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 / Remoto	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 Reserva de Agua	DO	NA

7	Piloto Rojo	Nivel Bajo Reserva de Agua	DO	NA
8	Potenciómetro	Velocidad de la Electrobomba	AI	0-10V

DI: Digital Input

DO: Digital Output

NA: Normalmente abierto

NC: Normalmente cerrado

AI: Analog Input

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 REMOTO, los comandos de arranque/parada y la referencia de caudal con un rango de 0,5 - 6 l/min 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 caudal diferente a 0.

3.5. DIAGRAMA P&ID

A continuación, se presenta el diagrama P&ID del sistema donde se puede observar que el PLC actúa sobre las bombas centrífugas según la lectura del sensor de caudal.

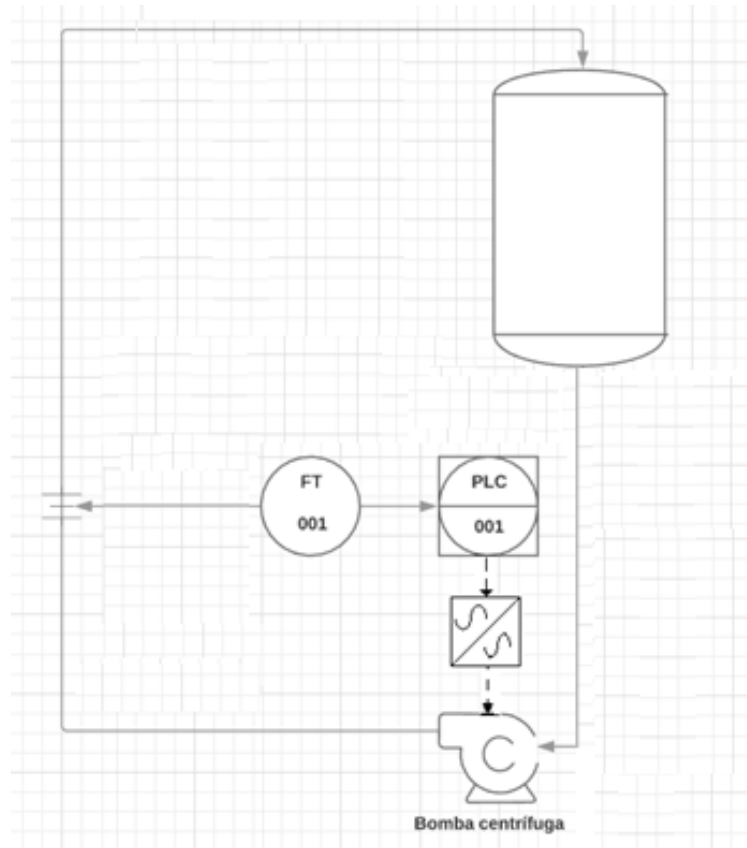


Figura 24: Diagrama P&ID.

3.6. 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 caudal, la cual es transmitida hacia el PLC para que a través de un algoritmo de control PID para regular la velocidad de la Electrobomba.

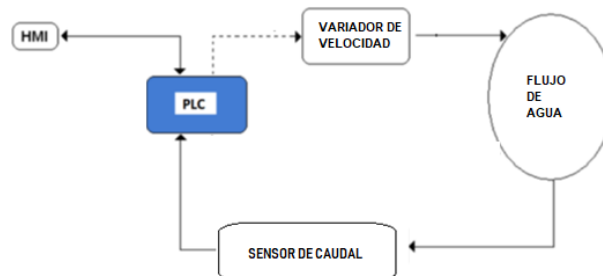


Figura 25: Diagrama de bloques del sistema.

3.7. 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.

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.

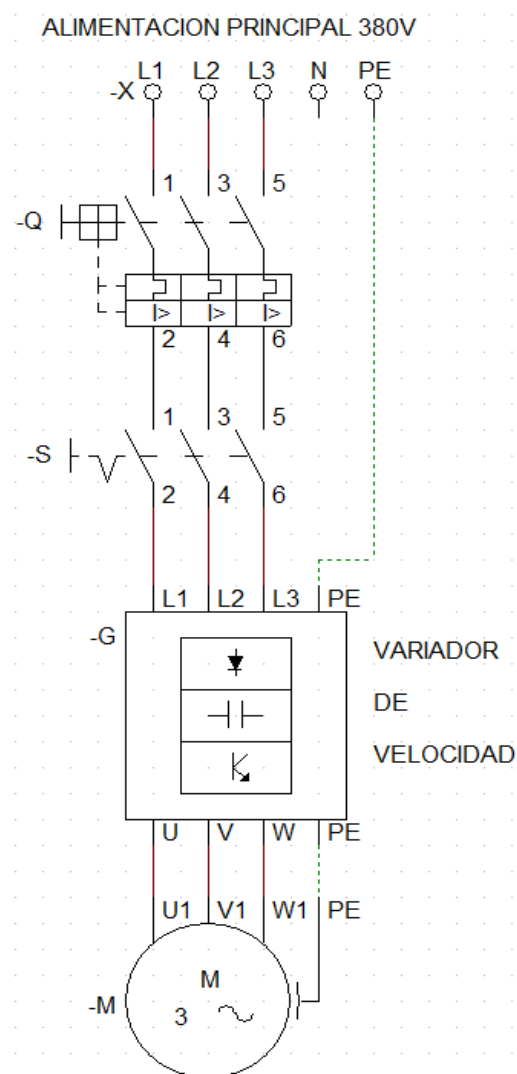


Figura 26: Circuito de Fuerza.

3.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del sistema, por la cual se muestra el funcionamiento del mismo.

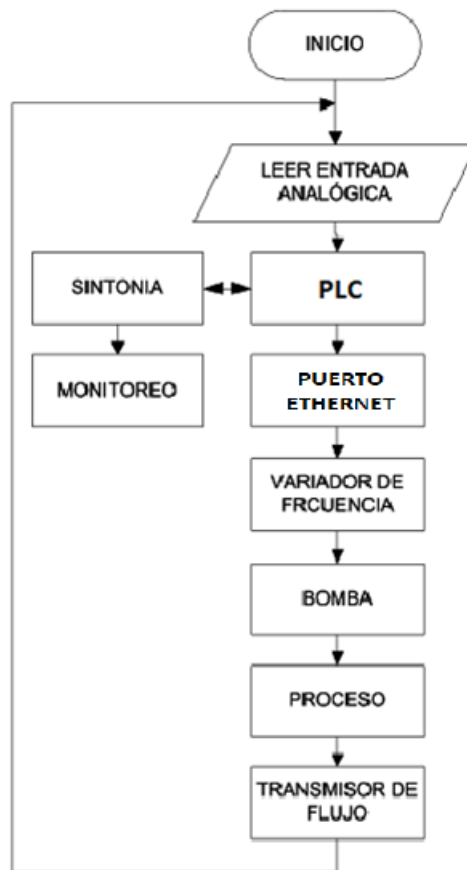


Figura 27: Diagrama de flujo del sistema.

Tal como se muestra en la anterior imagen el proceso funciona de la siguiente manera: El PLC lee la entrada analógica, ejecuta el PID y esto se muestra por el puerto ethernet del sistema donde va hacia el variador de frecuencia y esto se ve reflejado en la bomba por lo cual afecta el proceso y el transmisor de flujo mandará continuamente al PLC por medio de la entrada analógica la lectura continua y así se ira actualizando el proceso.

3.9. IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL Y MONITOREO

Tabla 2: Señales de control y monitoreo.

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

3.10. SELECCIÓN DE EQUIPOS

3.10.1. ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

3.10.1.1. SENSOR DE CAUDAL ROTATIVO DRH-Z3



Figura 28: Sensor de caudal Rotativo DRH-Z3.

3.10.1.1.1. DESCRIPCIÓN

Sensor de Caudal Electrónico de salida analógica estándar 4-20mA con un rango de 0,5 - 6 l/min, cuenta con un índice de protección IP65.

3.10.1.1.2. CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

• Gama de producto	KOBOLD
• Tipo de presostato	Transmisor de caudal
• Rango de medición:	0,5 - 6 l/min agua
• Conexión:	G 3/8, G 1, 3/8" NPT, 1" NPT
• Material:	laton, acero inox., POM, PVDF
• Max. presión:	100 bar
• Max. temperatura:	80 °C
• Precisión:	± 2,5 % fondo de escala
• Tipo de señal de salida	Analógico
• Función de salida analógica	4...20 mA, 2 hilos

3.10.2. ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

3.10.2.1. PLC

Para la elección del PLC se tiene en cuenta la capacidad de leer todas las entradas, realizar la lógica de control y controlar las salidas a campo; así como también el CPU deberá poder programar en lógica de escalera(ladder).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente en el proyecto se utilizó la Unidad Central de procesamiento Modicon BMXP342020.



Figura 29: 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

3.10.2.2. MÓDULO ENTRADAS Y SALIDAS

3.10.2.2.1. 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 Caudal y del Variador de velocidad.

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



Figura 30: Módulo de entradas y salidas analógicas BMXAMM0600.

Datos Técnicos:

- Protección del módulo contra sobretensiones
- 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
- Tensión: ± 10 V, ± 5 V, 0 a 10 V, 0 a 5 V y 1 a 5 V
- Corriente: 0...20 mA, 4...20 mA y ± 20 mA, en función de la elección realizada durante la configuración

3.10.2.2.2. 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 digitales BMXDDM3202K.

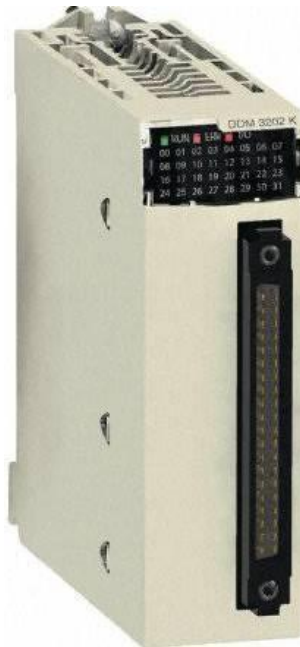


Figura 31: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K.

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

3.10.2.3. VARIADOR DE FRECUENCIA

3.10.2.3.1. VARIADOR DE FRECUENCIA ATV32HU15N4.

Para poder seleccionar un variador de frecuencia hay que tener en cuenta principalmente la potencia de la electrobomba y el tipo de alimentación. En este caso 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.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se propone utilizar el Variador de Frecuencia Altivar 32.



Figura 32: Variador de Frecuencia ATV32HU15N4.

Datos Técnicos:

- | | |
|----------------------------------|-------------|
| • Potencia Nominal | 1,5 kW |
| • Fase | 2 |
| • Tensión de Alimentación | 380 → 550 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 |

3.10.3. MODULO COM ETHERNET MB/TCP P/ATV32

Modulo ethernet para poder comunicar el variador de velocidad con el PLC mediante la red modbus TCP.



Figura 33: Modulo VW3A3616.

Datos Técnicos:

- Tipo de Accesorio Modulo de comunicación.
- Protocolo de comunicación Modbus TCP, Ethernet/IP

3.10.4. ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

3.10.4.1. ELECTROBOMBA

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



Figura 34: 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

3.10.5. INTERFAZ HOMBRE MAQUINA

3.10.5.1. 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 35: 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

3.11. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

3.11.1. MODO MANUAL

Este modo usualmente no funcionará, solo se usará en caso se quiera 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 el caudal en el sistema por medio del sensor instalado en las tuberías, cuando este caudal este más bajo que el caudal mínimo requerido por el sistema el variador de frecuencia hará que la Electrobomba impulse mayor cantidad de agua y cuando el caudal medido sea mayor automáticamente bajara la frecuencia de la Electrobomba.
- Para parar el sistema pulsamos Paro Automático.
- Volver el selector en la posición neutro.

3.12. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Para obtener el modelo matemático se empleó la herramienta Ident del software Matlab la cual permite estimar la función de transferencia de una planta en función de datos experimentales.

Medidas de Caudal

Tabla 3: Medidas de caudal

Frecuencia	Caudal
14	0.5
16	0.739
18	0.978
20	1.217
22	1.456
24	1.695
26	1.934
28	2.173
30	2.412
32	2.651
34	2.89
36	3.129
38	3.368
40	3.607
42	3.846
44	4.085
46	4.324
48	4.563
50	4.802
52	5.041
54	5.28
56	5.519
58	5.758
60	5.997

Luego se ejecuta el comando Ident y después de ejecutar el comando Ident, se muestra la siguiente ventana de configuración donde nos pide importar los datos experimentales de frecuencia y caudal.

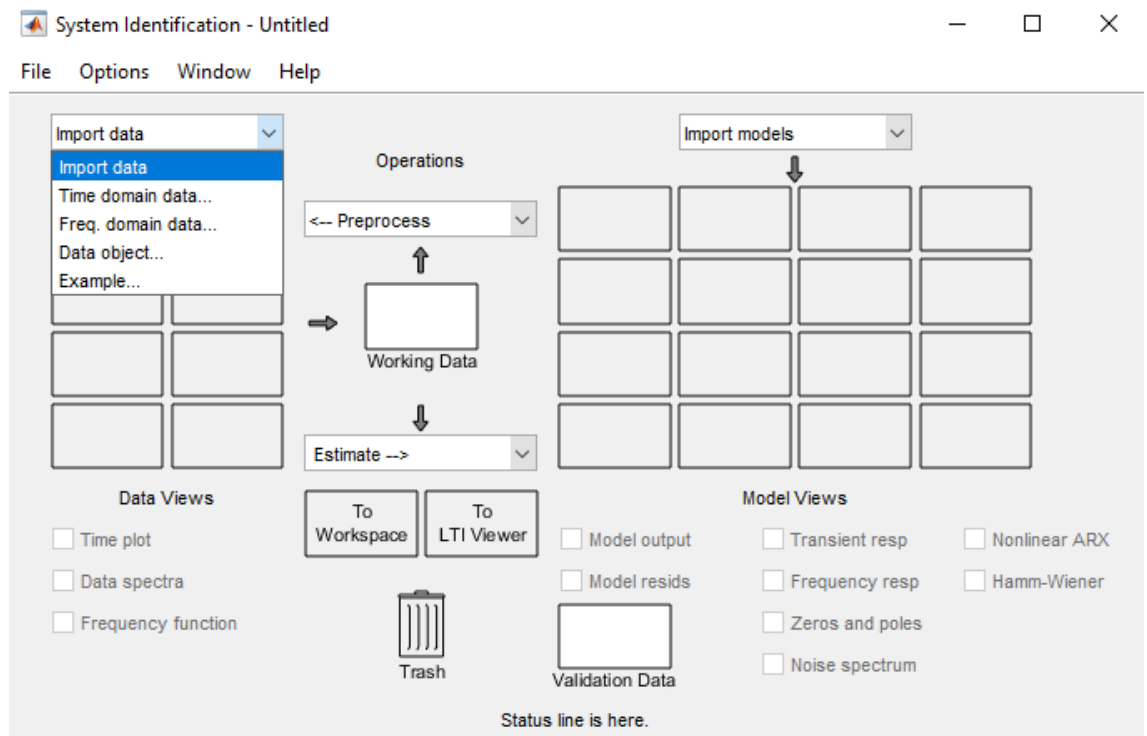


Figura 36: Programa Matlab.

Posteriormente se procede a ingresar los vectores de entrada (Frecuencia) y salida (Caudal).

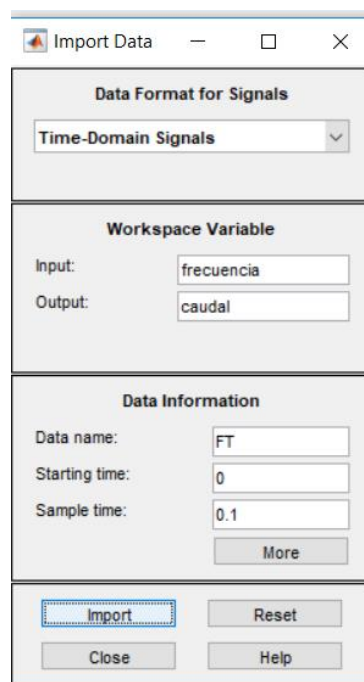


Figura 37: Programa Matlab.

Esta ventana permite estimar la función de transferencia del sistema.

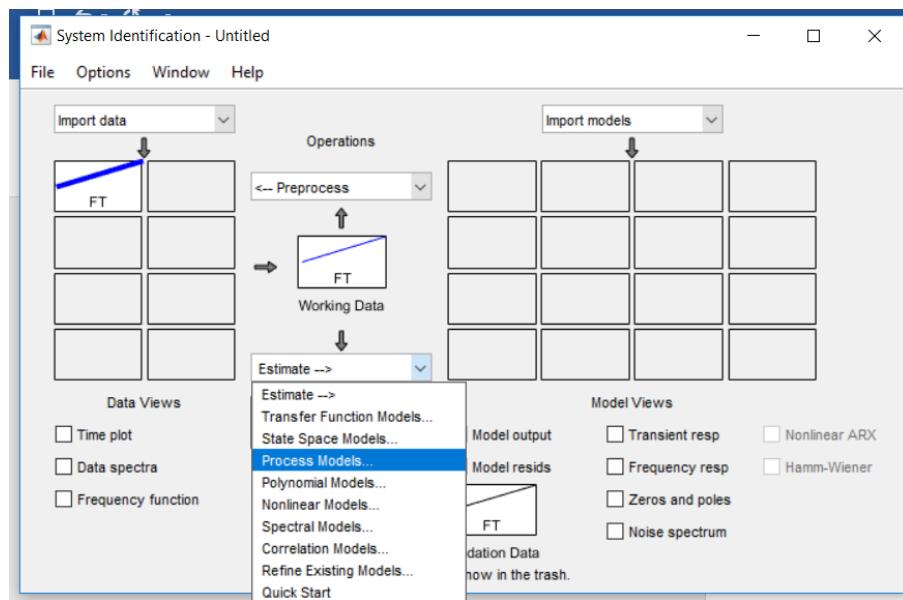


Figura 38: Programa Matlab.

Estimamos si nuestra función tiene un retardo en el tiempo o no, para eso tenemos que verificar que coincida mínimo en un 75%.

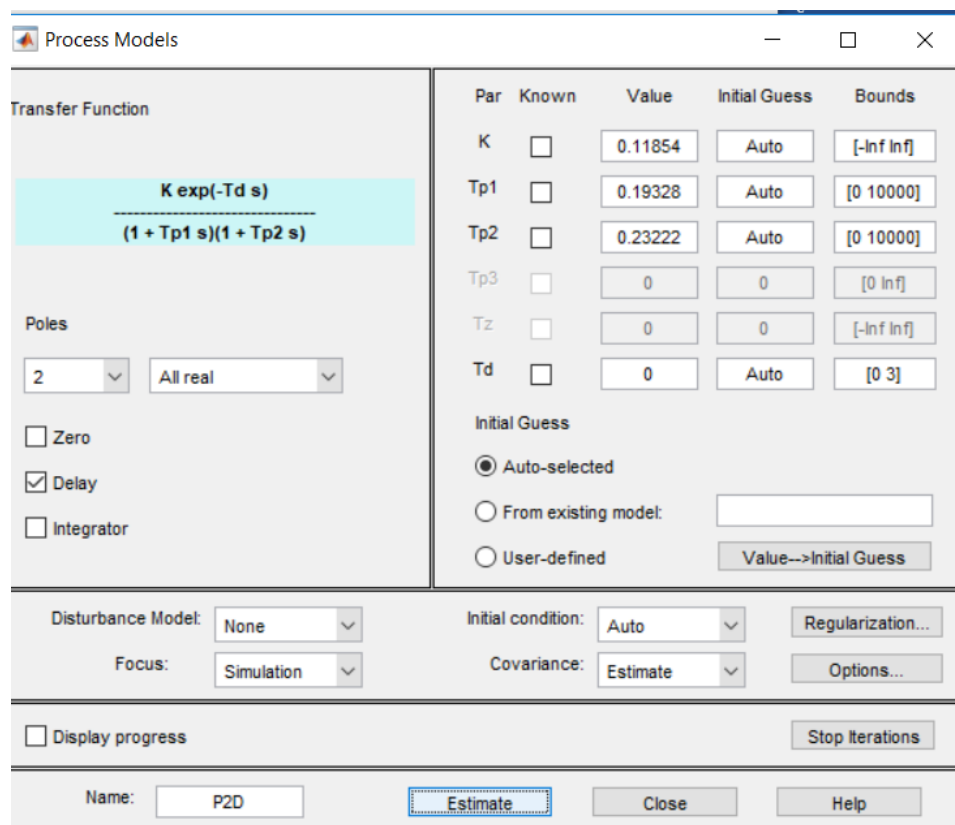


Figura 39: Programa Matlab.

Tal como se muestra en la siguiente imagen nuestra función de transferencia coincide en un 99.57% por lo cual dicha función si nos sirve.

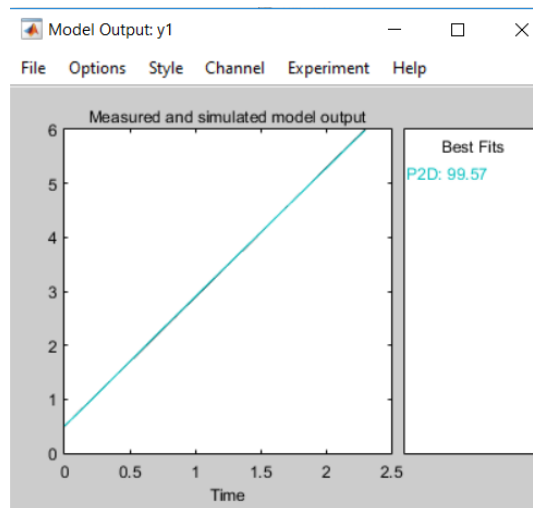


Figura 40: Programa Matlab.

Por lo cual nuestra función de transferencia vendría a ser la siguiente:

```
G =  
  
From input "u1" to output "y1":  
0.1185  
-----  
0.04488 s^2 + 0.4255 s + 1
```

Figura 41: Función de Transferencia.

Para hallar nuestras constantes K_p , K_i Y K_d hacemos uso de la función `pidtool` del Matlab donde importamos nuestra función de transferencia y automáticamente nos calculara dichos valores; pudiendo modificar la respuesta en el tiempo (más rápida y más lenta) y a su vez el comportamiento si más agresivo o más robusto.

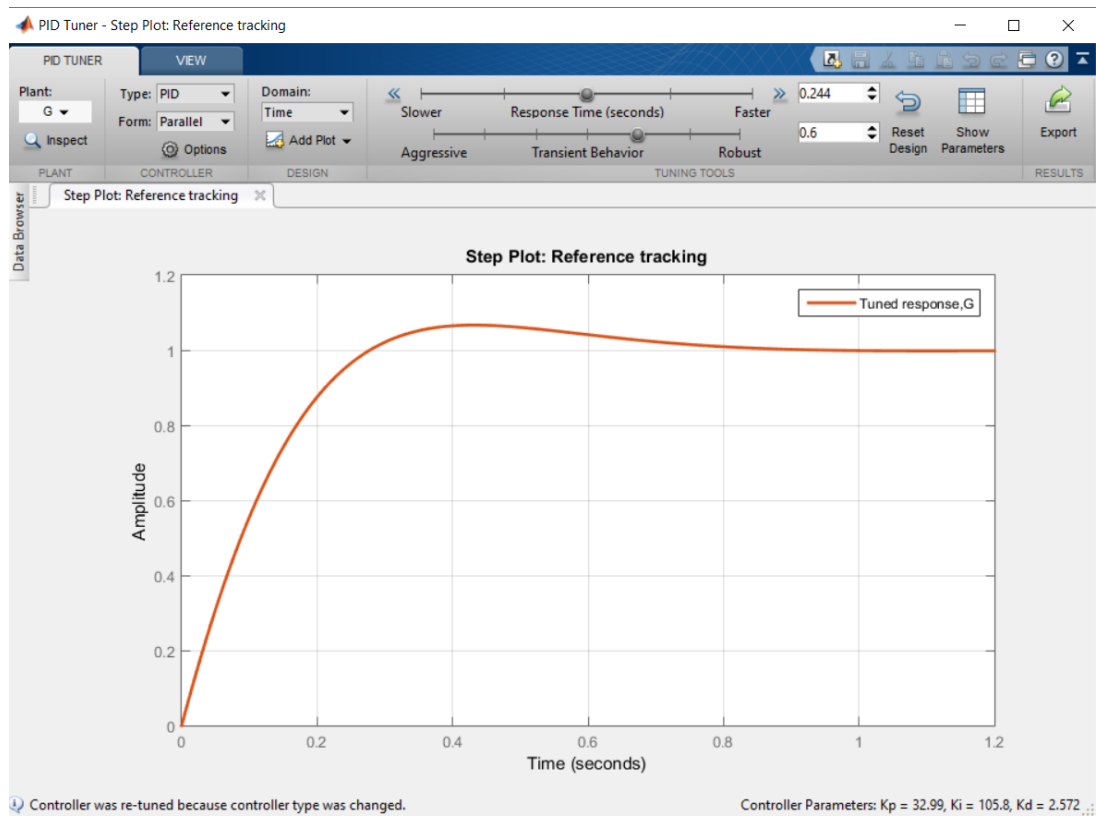


Figura 42: pidtool Matlab.

Controller Parameters	
	Tuned
K_p	32.9922
K_i	105.808
K_d	2.5718
T_f	
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.197 seconds
Settling time	0.715 seconds
Overshoot	6.67 %
Peak	1.07
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	73.9 deg @ 8.2 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 43: Constantes PID Matlab.

3.13. PROGRAMA PARA PLC, EN LENGUAJE LADDER

3.13.1. DIRECCIONAMIENTO DE VARIABLES EN EL PLC

Tabla 4: Direccionamiento de variables en el PLC.

Nombre	Tipo	Dirección
Sensor de Caudal	Int	%IW0.2.1
Potenciómetro	Int	%IW0.2.2
Selector Local	Ebool	%I0.1.0
Selector Remoto	Ebool	%I0.1.1
Marcha Local	Ebool	%I0.1.2
Paro Local	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

3.13.2. DIMENSIONAMIENTO DEL BASTIDOR

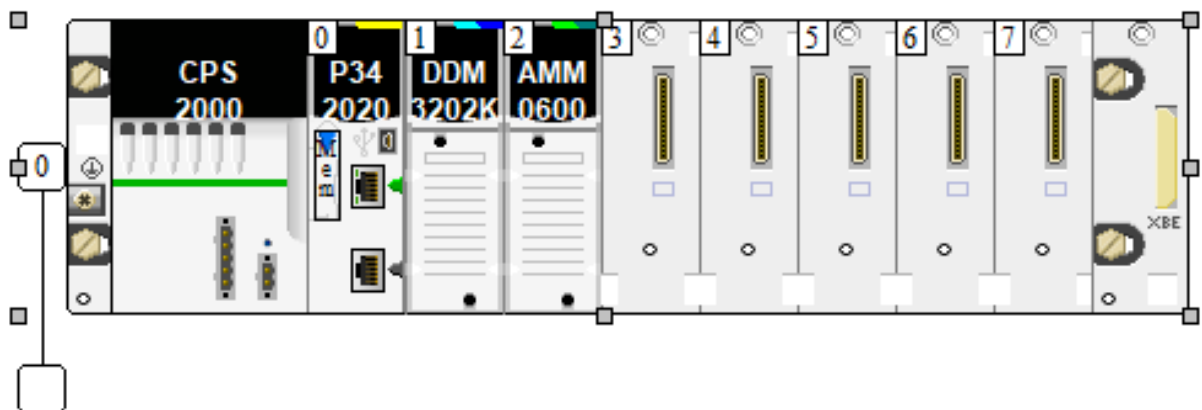


Figura 44: Bastidor.

3.13.3. CONFIGURACIÓN RED ETHERNET PLC

The screenshot shows the 'Configuración IP' (IP Configuration) window in the SIMATIC Manager. It includes a 'Familia de modelo' (Model Family) dropdown set to 'CPU 2020, CPU 2030 (>= V02.00), PRA 0100'. Below this, there are fields for 'Dirección IP del módulo' (Module IP Address) with a value of 192.168.1.10, 'Máscara de subred' (Subnet Mask) with a value of 255.255.255.0, and 'Dirección de pasarela' (Gateway Address) with a value of 192.168.1.1. The 'Configuración Ethernet' (Ethernet Configuration) section shows 'Ethernet II' selected. The 'Utilidades del módulo' (Module Utilities) section shows 'SMTP' selected.

Figura 45: Ethernet PLC.

3.13.4. VARIABLES EN EL SOFTWARE DEL PLC

Nombre	Tipo	Valor	Comentario	Dirección
Selector_Remoto	EBOOL		Selector Modo Remoto	%I0.1.0
Selector_Local	EBOOL		Selector Modo Local	%I0.1.1
Marcha_Local	EBOOL		Marcha del Sistema en Modo Local	%I0.1.2
Paro_Local	EBOOL		Paro del Sistema en Modo Remoto	%I0.1.3
Falla_Variador	EBOOL		Entrada Falla Variador	%I0.1.4
Sensor_Caudal	INT		Entrada Presion 4-20mah	%IW0.2.1
Pot_Manual_Caudal	INT		Potenciometro	%IW0.2.2
M_Activador_Variador	EBOOL			%M0
M_Remoto_Funcionando	EBOOL			%M1
M_Falla_Variador	EBOOL			%M2
M_Marcha	EBOOL			%M3
M_Paro	EBOOL			%M4
M_Lampara_Sistema_F	EBOOL			%M5
M_Marcha_Remoto	EBOOL			%M6
M_Local_Funcionando	EBOOL			%M7
M_Paro_Remoto	EBOOL			%M8
M_Selector_Local	EBOOL			%M9
M_Selector_Remoto	EBOOL			%M10
M_Sistema_Funcionando	EBOOL			%M11
M_PID	REAL			%MW0
M_Potenciometro	INT			%MW1
M_Potenciometro_Real	REAL			%MW2
M_caudal	INT			%MW4
M_caudal_Scaling	REAL			%MW6
M_caudal_Sistema	INT		Caudal del Sistema	%MW7
M_Salida_PID	INT			%MW8
M_Valor_Variador	INT			%MW9
M_Valor_Variador_Real	REAL			%MW10
M_Potenciometro_Scaling	REAL			%MW20
M_caudal_Real	REAL			%MW30
M_Variador_PID	REAL			%MW40
Activar_Variador	EBOOL		Salida Activar Variador	%Q0.1.16
Lampara_Sistema_Funcionando	EBOOL		Lampara Sistema Funcionando	%Q0.1.17
Valor_Variador	INT		Salida valor PID al Variador	%QW0.2.5

Figura 46: Variables PLC.

3.13.5. PROGRAMA PARA PLC

3.13.5.1. PROGRAMA LADDER

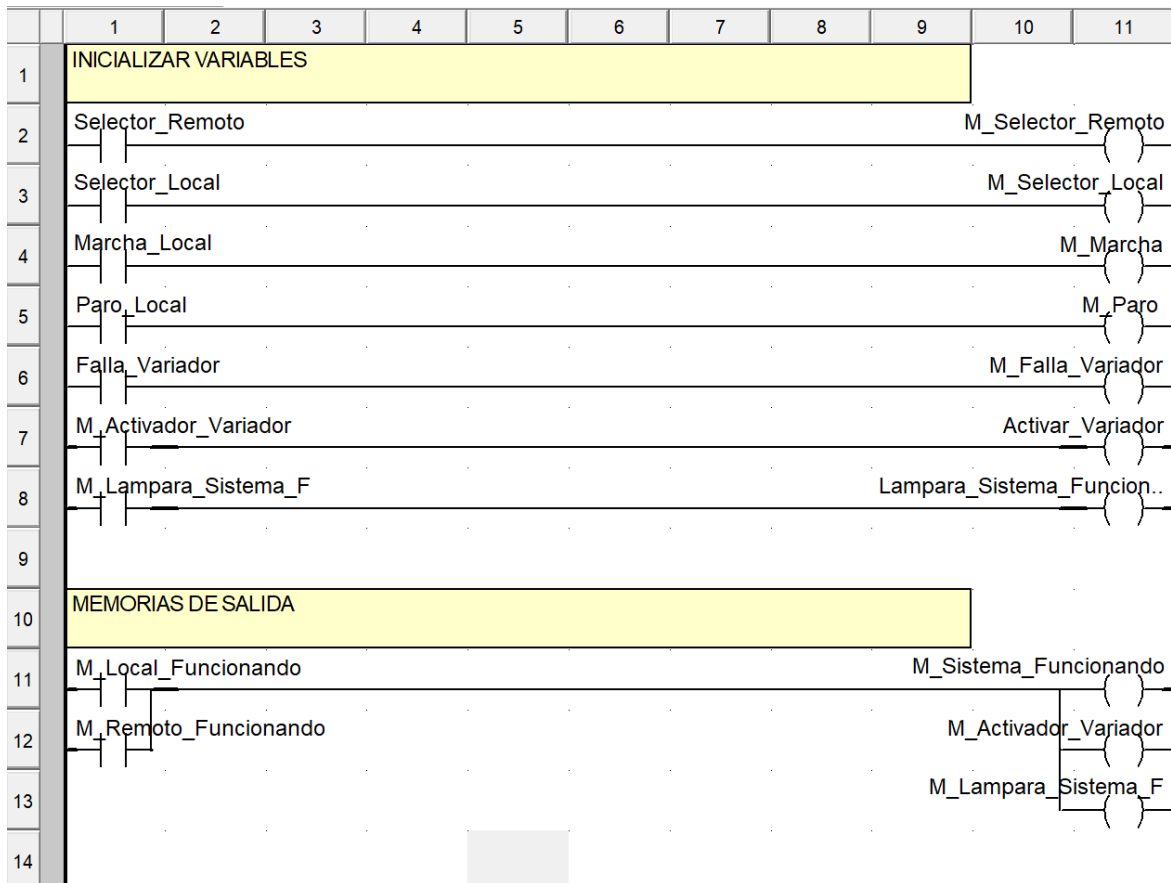


Figura 47: Programa PLC.

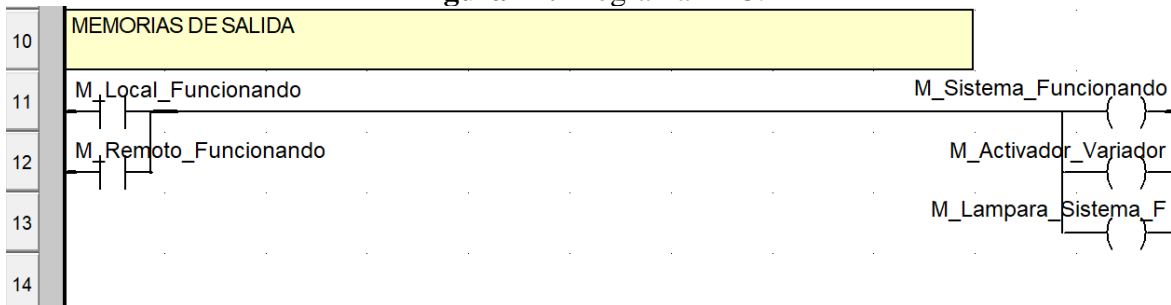


Figura 48: Programa PLC.

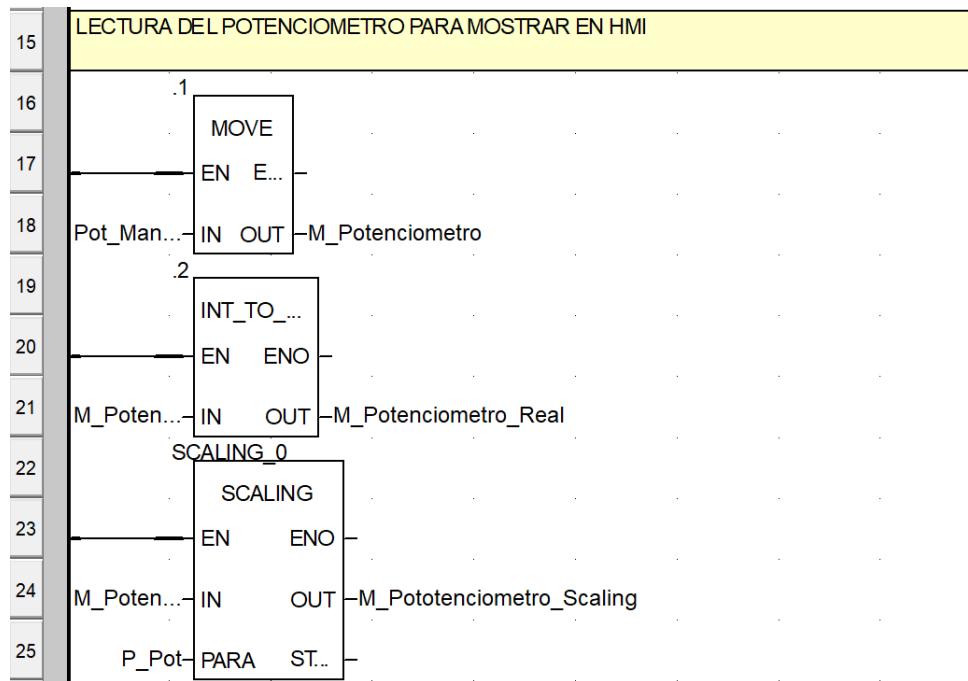


Figura 49: Programa PLC.

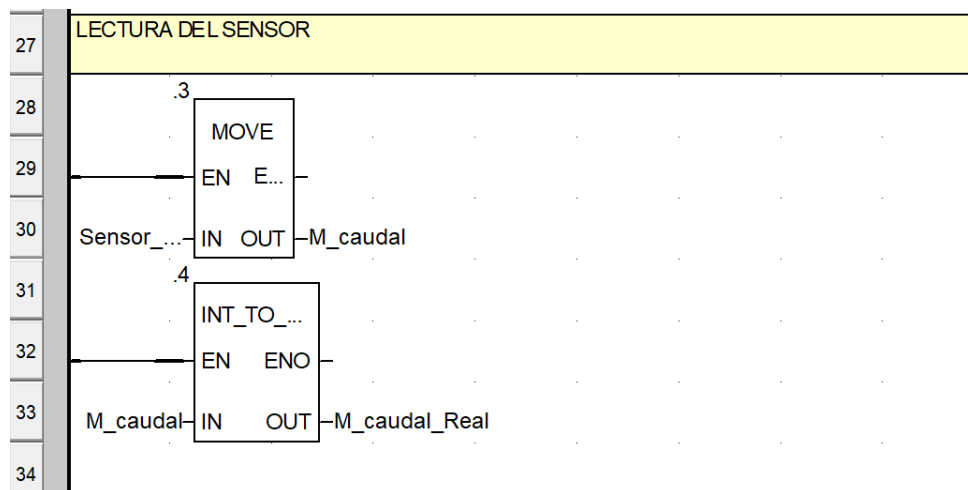


Figura 50: Programa PLC.



Figura 51: Programa PLC.

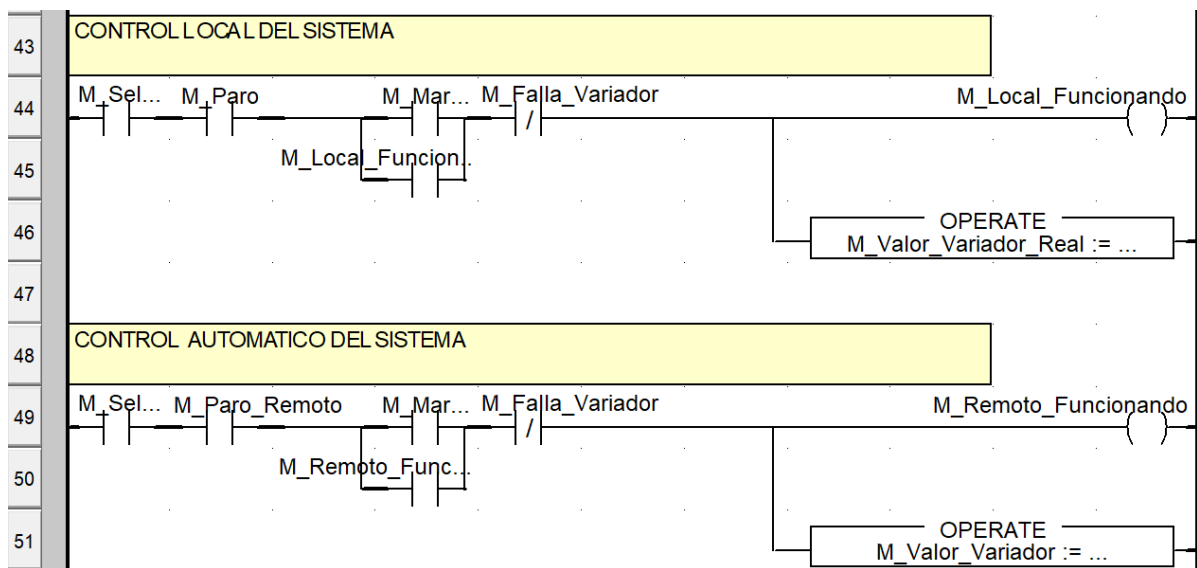


Figura 52: Programa PLC

3.13.5.2. PROGRAMA DE BLOQUE DE FUNCIONES

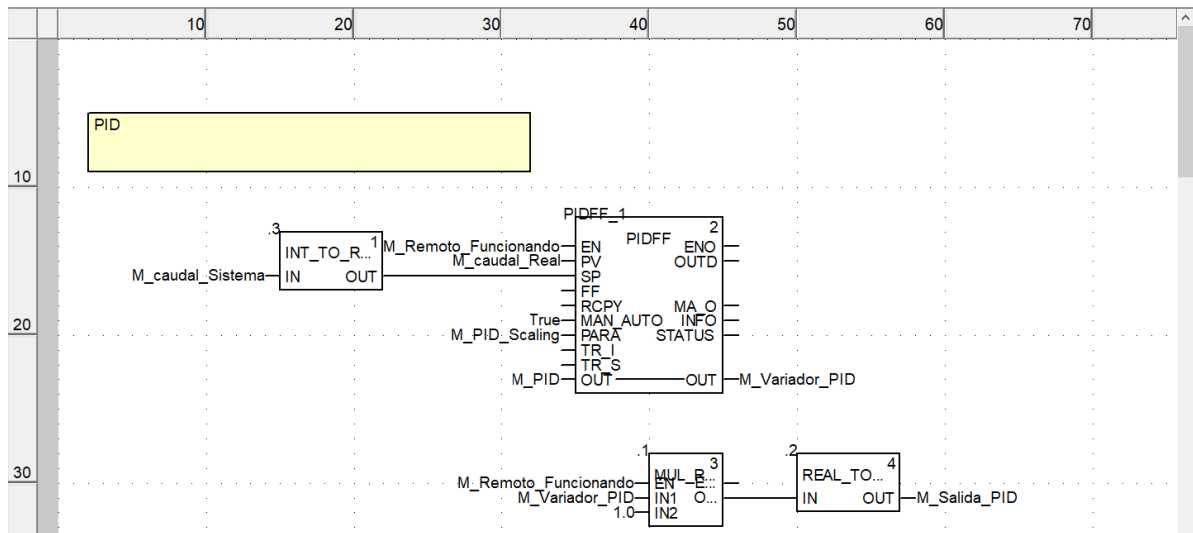


Figura 53: Programa PLC.

3.13.6. CONFIGURACIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA

3.13.6.1. PROGRAMACIÓN ATV32

- 1) Luego de añadir el ATV32, procedemos a conectarnos a él para obtener sus parámetros de configuración.

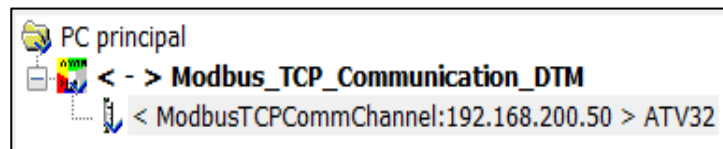


Figura 54: Conexión con el ATV32 desde el Unity Pro XL.

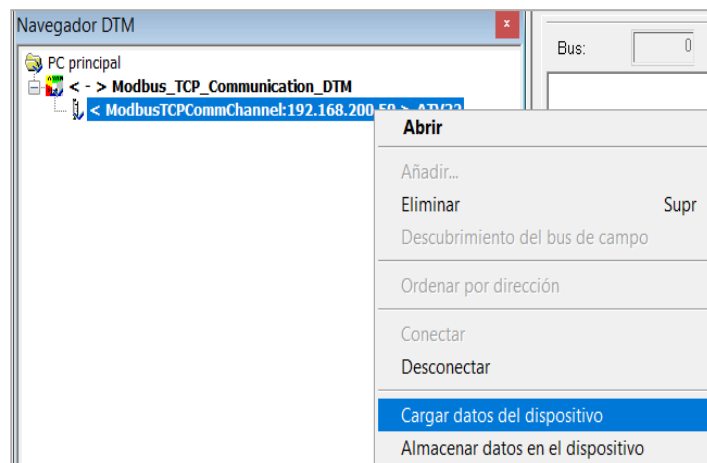


Figura 55: Cargar datos del ATV32.

⚠ ADVERTENCIA

UNANTICIPATED EQUIPMENT OPERATION

Drive systems may perform unexpected movements because of incorrect wiring settings, incorrect data or other errors.

- Only appropriately trained persons who are familiar with and understand the use of all pertinent product documentation and who have received safety training to recognize and avoid hazards involved are authorized to work on and with the system.
- Only use this software for setup and commissioning tasks and to display status.
- Verify that other applications on your computer such as, but not limited to, cannot interfere with the proper operation of this software.
- Verify that an integrated and functioning emergency stop push-button is wired correctly.
- Verify that all parameter settings are suitable for the application.
- Do not operate the product with unknown and unsuitable settings or data.

☒ I have read and fully understood these instructions and all pertinent product documentation.

OK
Cancelar

Figura 56: Pantalla de advertencia.

2) Finalmente, se muestra una pantalla donde están todos los parámetros del variador de frecuencia ATV32.

los datos no están sincronizados

Mi dispositivo
Operate
Lista de parámetros
Fallo

Características:

Corriente transitoria máx. 16.5 A
Corriente nominal 11 A
Tensión de alimentación 240 V
Potencia nominal 2.2 KW

Estructura:

Tarjeta	Referencia	Número de serie	Versión	Nomb. proveedor
Dispositivo	ATV32HU22M2	XX X1 10 428 059	V1.3IEXX	Schneider Electric
Placa de control		XX X1 06 034 269	V1.3IE04	
Tarjeta de potencia		XX X1 07 024 053	V1.2IE02	
Modbus TCP - EtherNet IP	VW3A3616	XX X6 00 000 000	V1.5IE06	Schneider Electric
Motor	NINGUNO			

Configuraciones:

Versión de software 2.0.3.3

Estado seg. STD CRC1: 2151

Device Information : Device Name

Figura 57: Menú de configuración del ATV32 desde Unity Pro XL.

3.13.6.2. CONFIGURACIÓN DEL ATV32

Existen tres formas para configurar el variador de velocidad ATV32: mediante la rueda giratoria del propio variador de velocidad (manualmente), con el software SOMOVE o mediante el software Unity Pro; para este caso, la configuración se está realizando mediante el software Unity Pro XL.

A continuación, se muestran los pasos que se deben seguir para configurar correctamente el variador de velocidad ATV32 mediante el software Unity Pro XL.

1) Clic en la pestaña “Operate” para configurar los parámetros del ATV32.

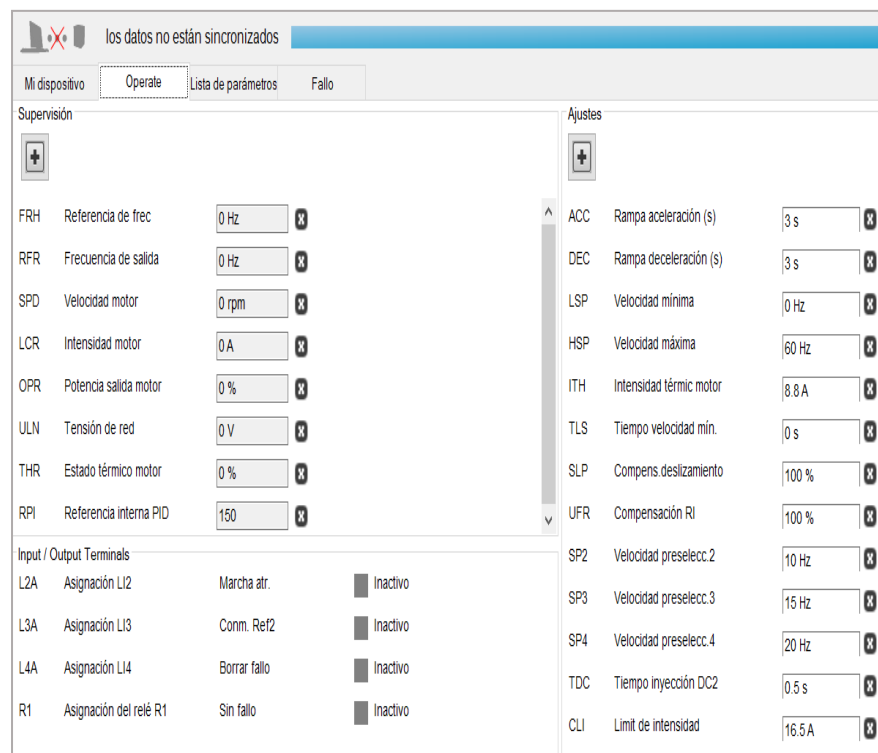


Figura 58: Menú de configuración de ATV32.

2) Clic en la pestaña “Ajustes (+)” para agregar y configurar los parámetros de control del ATV32.

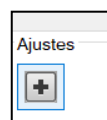


Figura 59: Ajustes.

FR1	Canal Referencia 1	Carta COM.	x
CHCF	Config. modo control	Perfil E/S	x
CCS	Conmutación canal ctrl	CD1	x
CD1	Config. canal control1	Carta COM.	x
CD2	Config. canal control2	Carta COM.	x
RFC	Asig.conmut.ref.(1a 2)	LI3	x
FR2	Canal Referencia 2	HMI	x

Figura 60: Configuración de parámetros del ATV32.

3) El siguiente paso es configurar los parámetros de red del ATV32 para habilitar el “Explorador de E/S”.

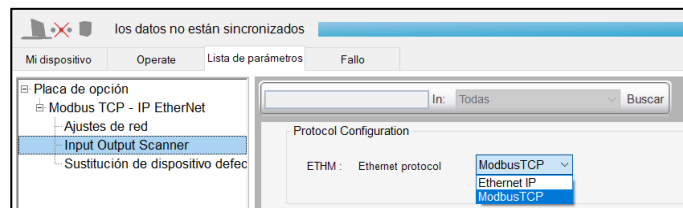


Figura 61: Habilitar Modbus TCP.

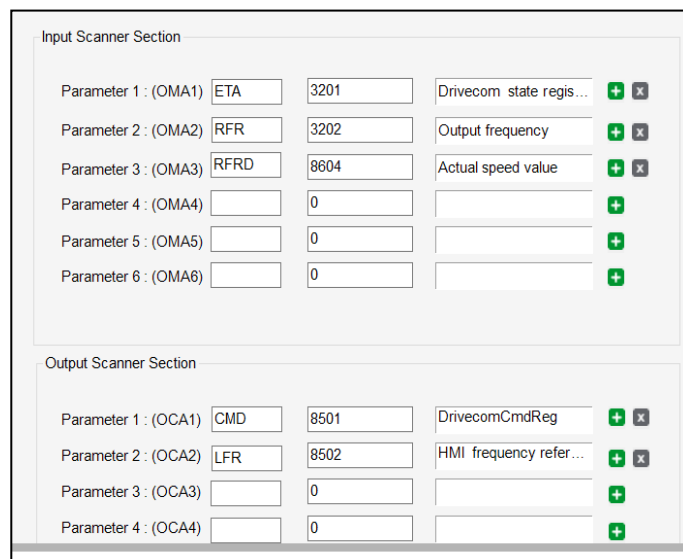


Figura 62: Parámetros de lectura y escritura.

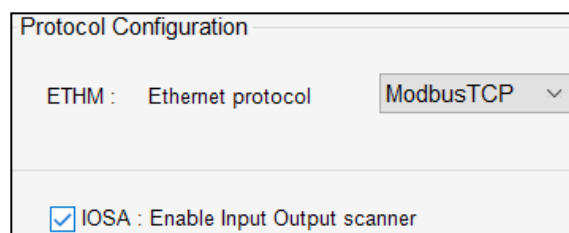


Figura 63: Habilidad del Explorador de E/S.

En la opción “Ajustes de Red”, se debe ingresar la dirección IP del módulo de comunicación Ethernet BMX NOE 0110.

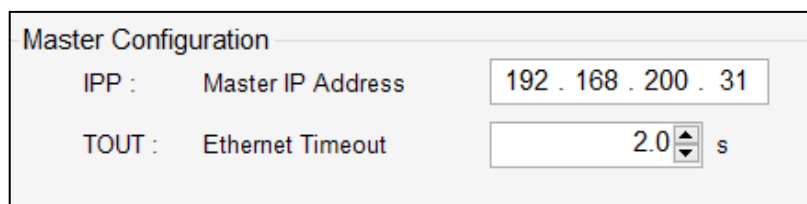


Figura 64: Configuración IP del máster.

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 0,5 - 6 l/min. 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

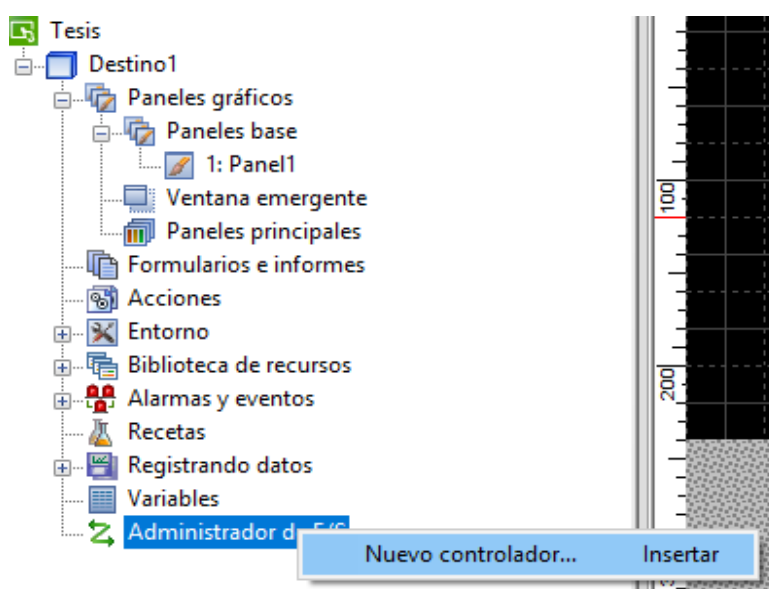


Figura 65: Configuración HMI en Vijeo Designer.

- Seleccionamos ModbusTCP/IP

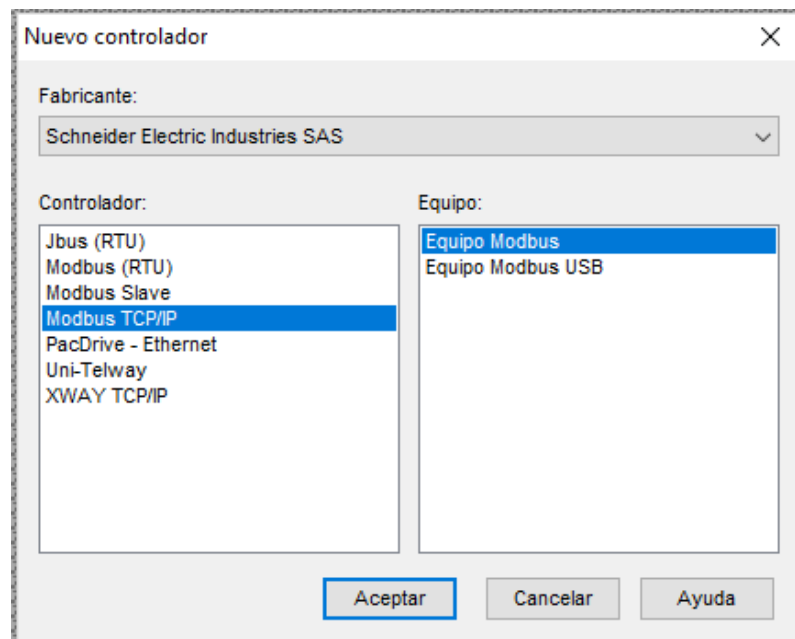


Figura 66: Configuración HMI en Vijeo Designer.

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

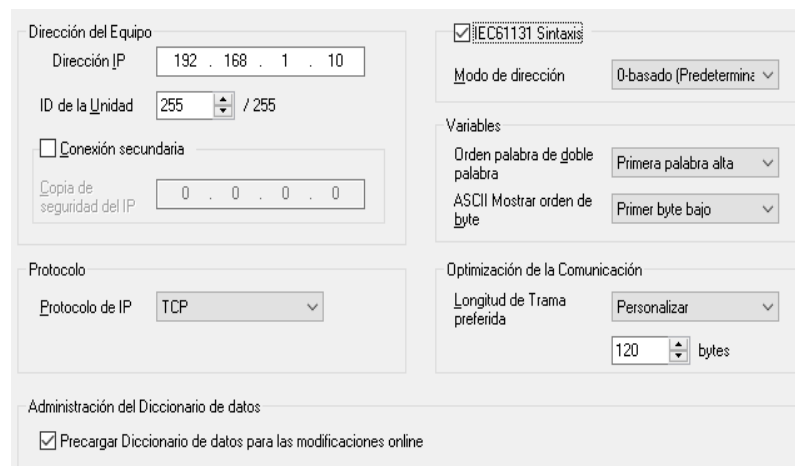


Figura 67: Configuración Comunicación PLC-HMI.

Aquí se puede observar las alarmas de nivel alto y bajo, el tipo de control (Local o Remoto) 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 68: Carátula HMI.

- Panel principal HMI

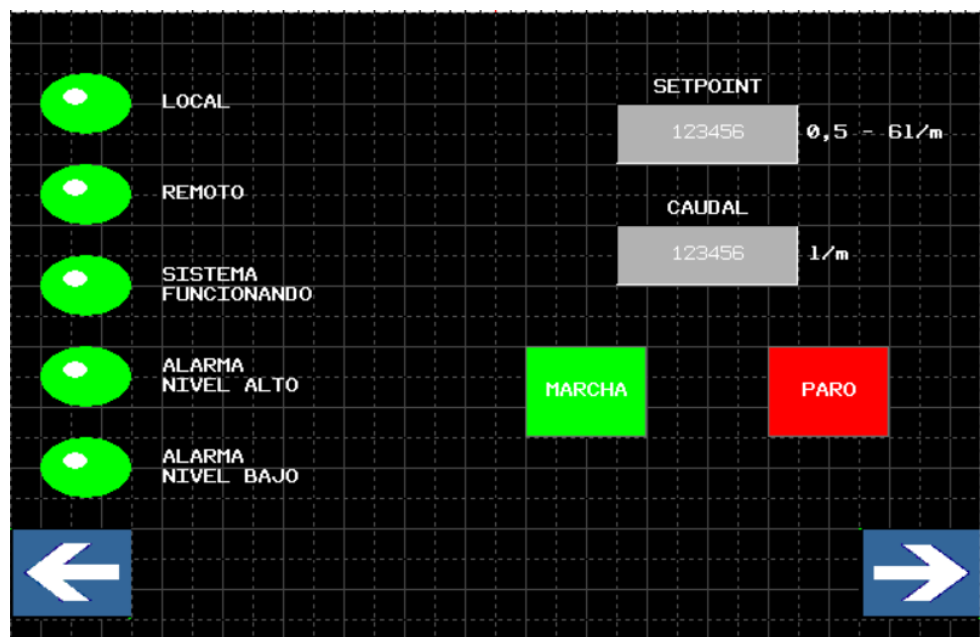


Figura 69: Panel principal HMI

- Panel control HMI

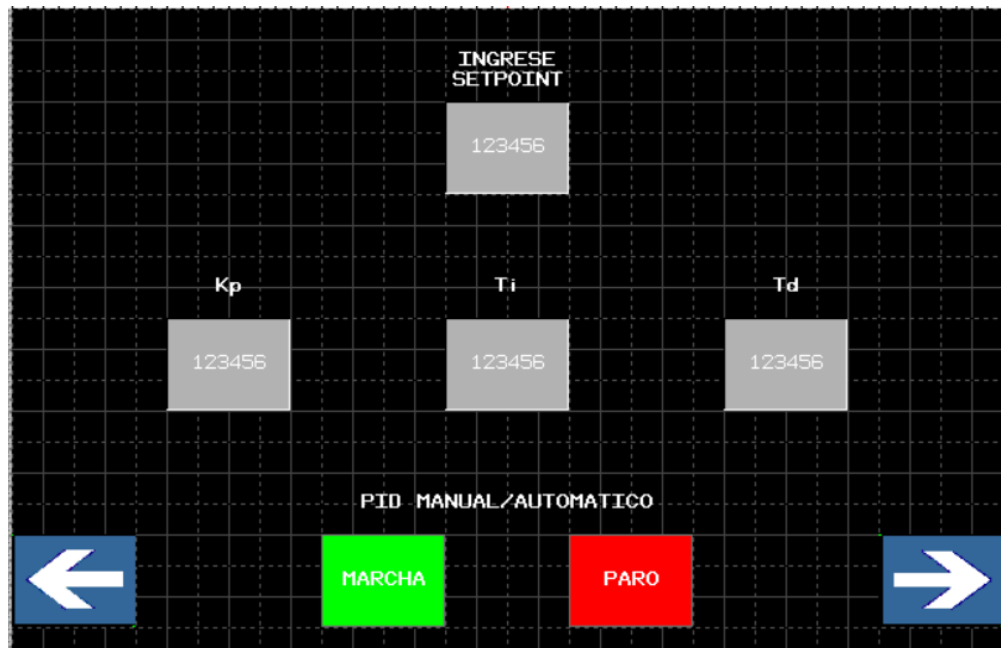


Figura 70: Panel control HMI.

3.15. DISEÑO ESTRUCTURAL 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.

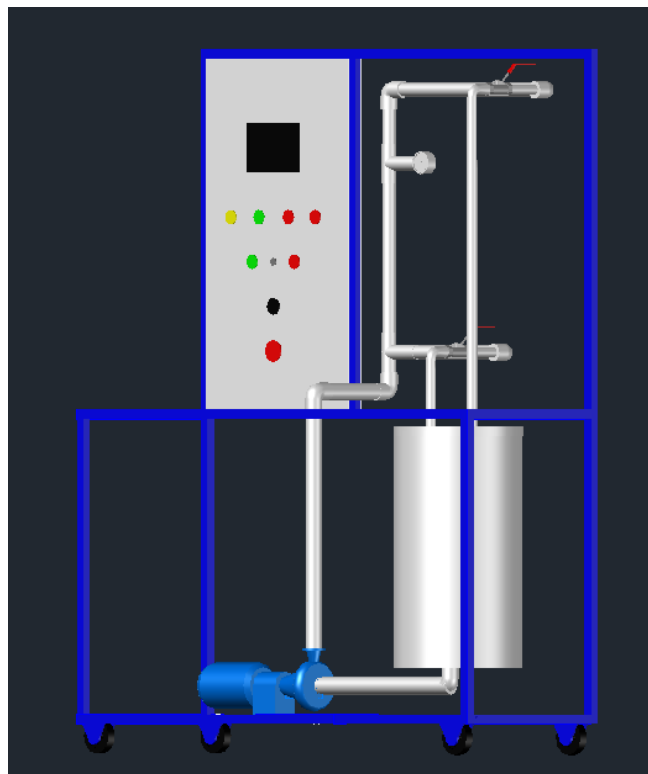


Figura 71: Vista lateral.

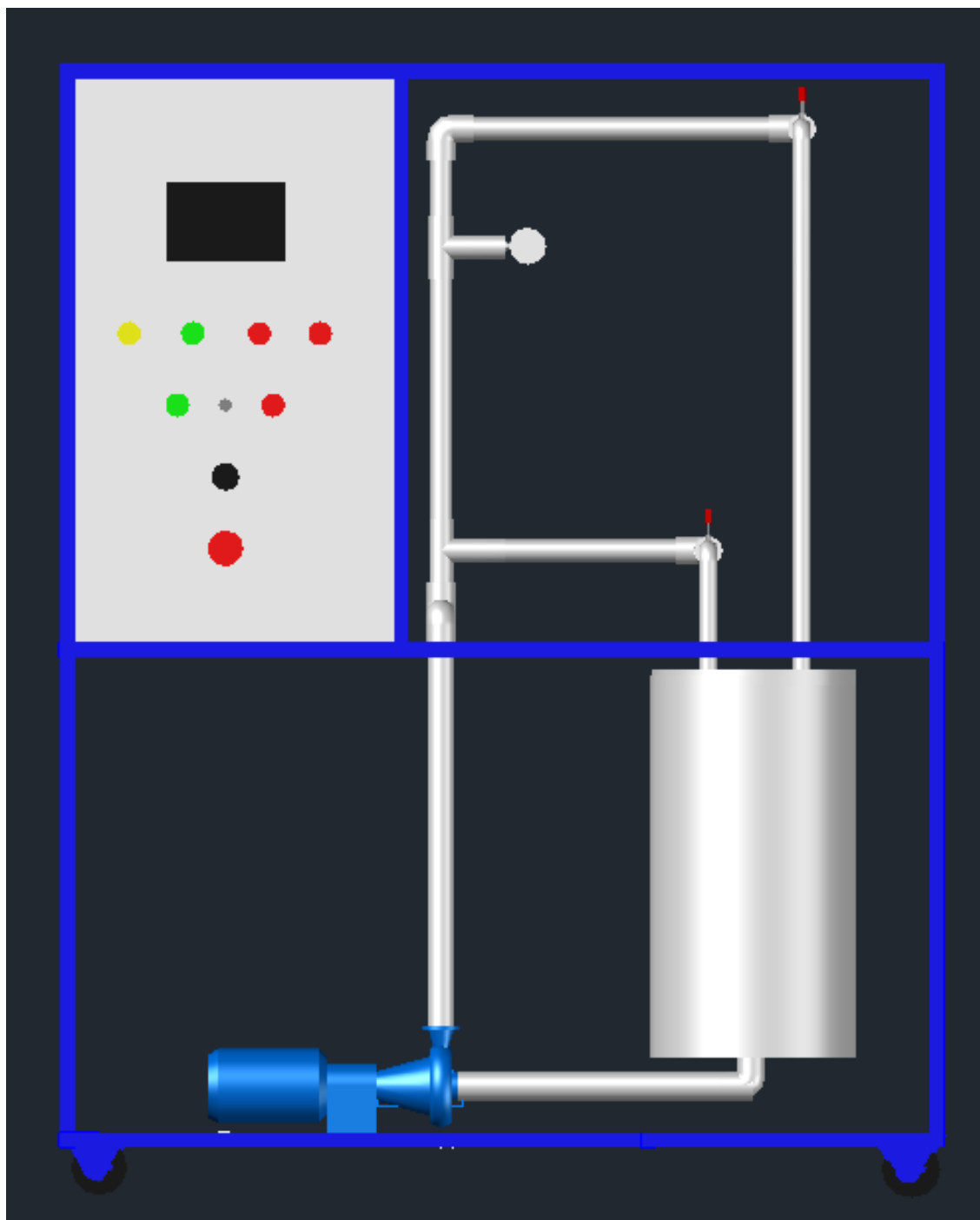


Figura 72: Vista frontal.

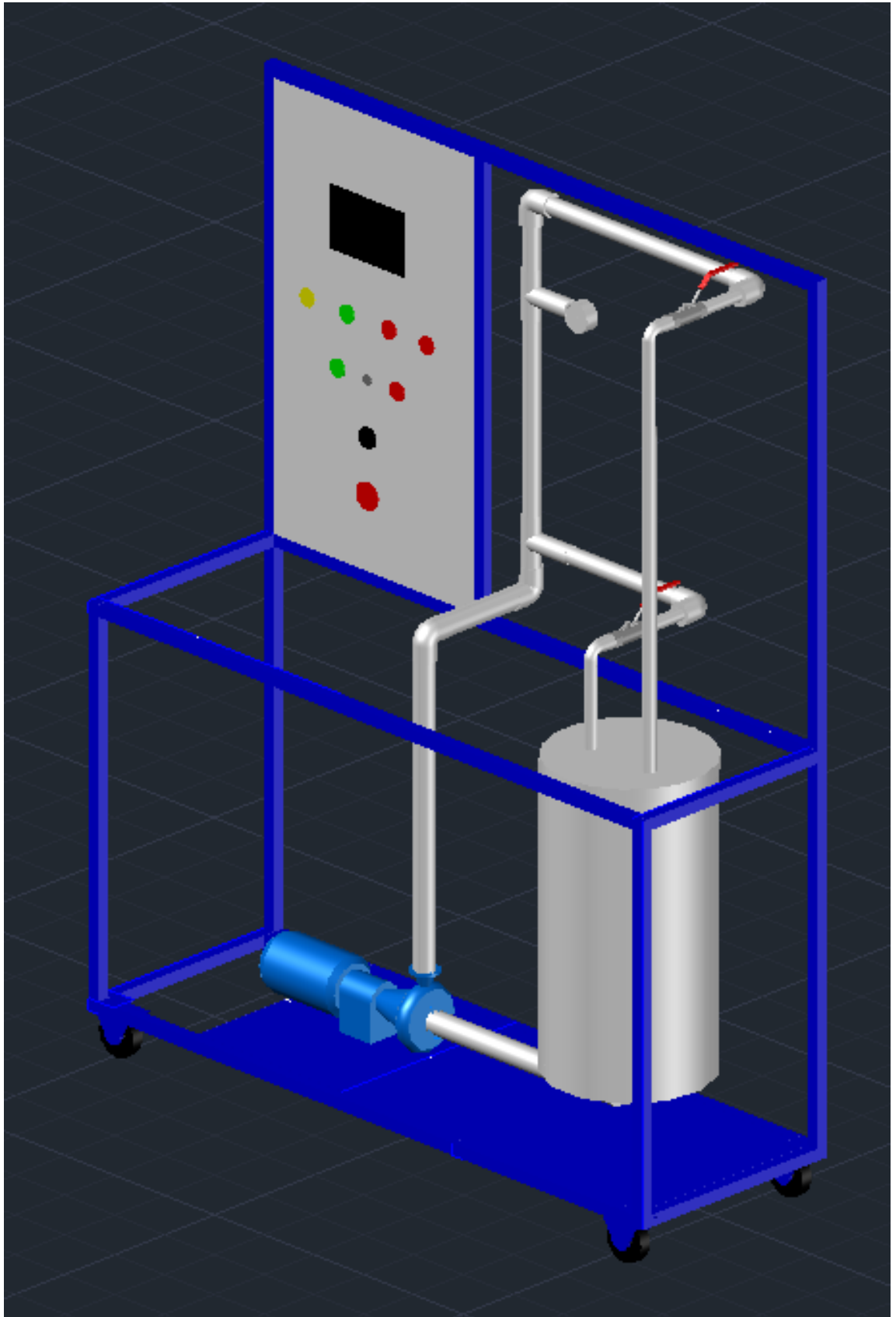


Figura 73: Vista lateral.

3.16. SIMULACION

A continuación, se muestra la simulación del sistema donde una vez obtenidos los datos del PID por medio del Matlab podremos simular dichos valores en el programa de LabVIEW y así verificar el correcto funcionamiento del sistema.

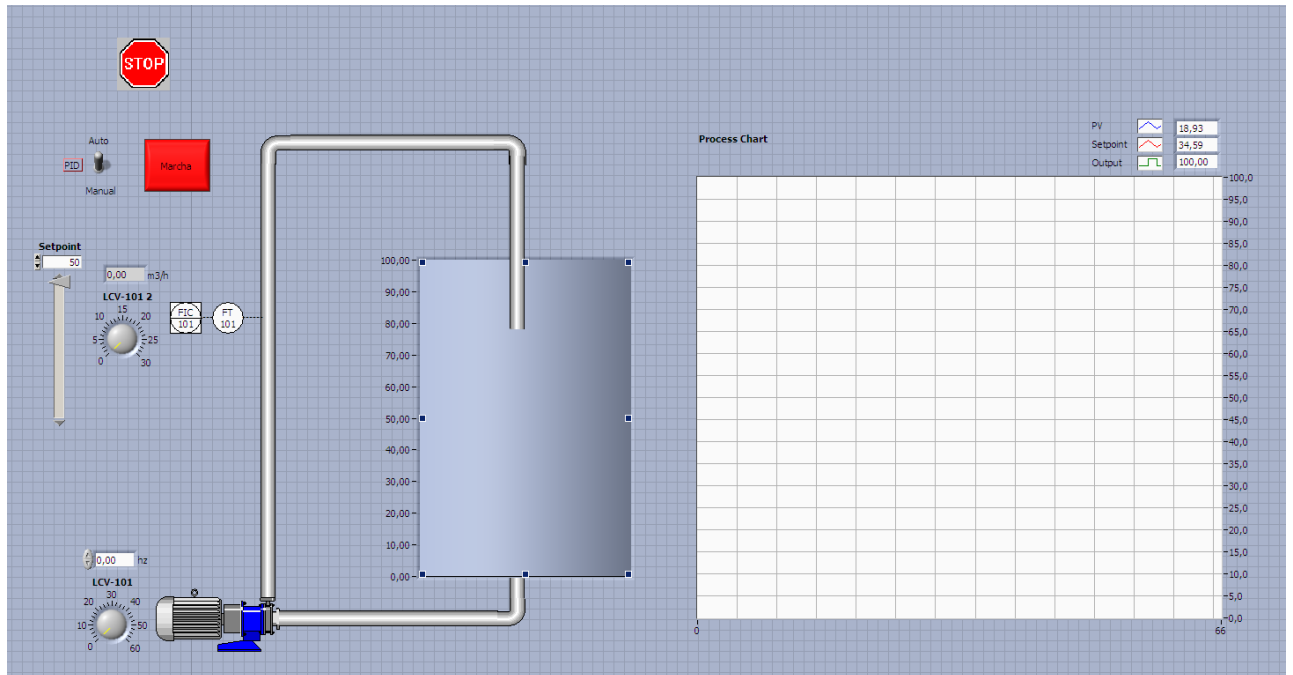


Figura 74: Simulación del sistema.

En la anterior simulación podremos observar la velocidad de la bomba, así como variar el SETPOINT, pudiendo realizarla de modo manual o el sistema realizarlo automáticamente.

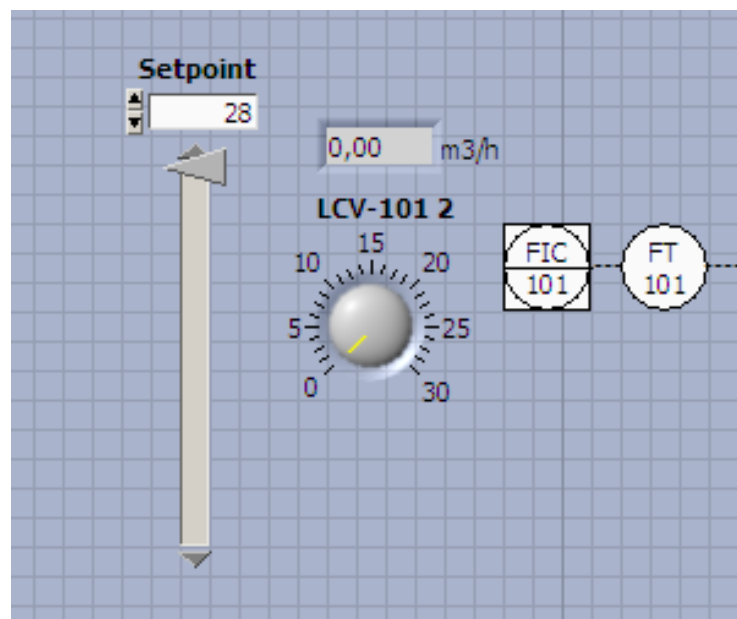


Figura 75: Simulación del sistema.

3.17. PRESUPUESTO

3.17.1. COSTOS DE HARDWARE

Tabla 5: Costos de Hardware.

ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO
Sensor de Caudal DRH-Z3	1	S/. 980.40
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/. 12 613.64

3.17.2. 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
Vídeo Designer	1	S/. 0
	TOTAL	S/. 0

3.17.3. COSTOS TOTALES

Tabla 7: Costos totales.

DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
Costo de Hardware	S/. 12 613.64
Costo de Software	S/. 0
Costo de Ingeniería	S/. 3 500.00
Costo de Instalación	S/. 2 000.00
Costo de Capacitación (8 horas)	S/. 800.00
TOTAL	S/. 18 913.64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

- 1) Se desarrolló satisfactoriamente el Diseño y simulación una mini planta industrial de un sistema de control de caudal para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la UNPRG.
- 2) Se seleccionó adecuadamente los sensores y actuadores de acuerdo con los requerimientos de un sistema de caudal.
- 3) Se diseño el diagrama P&ID.
- 4) Se seleccionó correctamente el software (LabVIEW) que permitió la simulación del módulo.
- 5) Con la futura implementación de un módulo de un sistema de control de caudal 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 caudal deben ser calibrados para comprobar que operan según las condiciones de diseño. Las modificaciones al sistema enfocadas a mejorar la uniformidad, corregir caudal 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 utilizar las borneras existentes por borneras tipo fusible para evitar daño por cortocircuito a los módulos y/o equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Ballester, J.A. Fernandez, & J.A. López Geta. (199). *Medida y evaluacion de las extracciones de agua subterranea*. Madrid: Instituto Tecnologico Geominero de España.
- ABB. (s.f.). *ABB*. Obtenido de ABB: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- Darwin, G. O. (4 de Julio de 2012). *DSPACE ESPOCH*. Obtenido de DSPACE ESPOCH: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1951>
- Fox, A. (12 de Febrero de 2017). *Universo Electronico*. Obtenido de <https://universoelectricocomunidad.blogspot.com/2017/02/entrada-de-prueba.html>
- García, R. P., Reinoso García, O., García Aracil, N., & Aracil Santonja, R. (2003). *Apuntes de Sistemas de Control*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- IDboxRT. (27 de Julio de 2018). *IDboxRT*. Obtenido de IDboxRT: <https://idboxrt.com/blog/la-automatizacion-industrial-la-clave-del-exito-industrial/>
- Miguel. (11 de Marzo de 2015). *Control Real Español*. Obtenido de Control Real Español: <http://controlreal.com/es/controlador-logico-programable-plc/>
- Rubio Quispe, G. M., & Choton Posadas, H. B. (13 de Octubre de 2016). *Repositorio UPAO*. Obtenido de Repositorio UPAO: <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/1935>
- Soriano, M. S. (s.f.). *Universidad de El Salvador - Vicerrectoria Academica*. Obtenido de Universidad de El Salvador - Vicerrectoria Academica: https://expediente.ues.edu.sv/uiu/elementos_estudio/ciencias_naturales/fisica/hidrodinamica/fluidos.pdf
- Universidad del pais vasco. (s.f.). *Universidad del pais vasco*. Obtenido de Universidad del pais vasco: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/viscosidad/viscosidad.htm>
- Vega Monge, P. E. (16 de Agosto de 2012). *Repositorio Digital - EPN*. Obtenido de Repositorio Digital - EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4834>

Villajulca, J. C. (22 de Septiembre de 2012). *Instrumentacion y Control.net*. Obtenido de Instrumentacion y Control.net: <http://instrumentacionycontrol.net/configuraciones-de-plc-compactos-y-modulares/>