



**Diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel y caudal
en dos tanques para el Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica de
la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE**

Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina y Ochoa Salinas, Andrea Catherine

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica

Ing. Gómez Reyes, Alejandro Paul. MSc

24 de agosto del 2023



Tesis_Martinez_Ochoa_Copyleaks.pdf

Scan details

Scan time: August 22th, 2023 at 14:26 UTC Total Pages: 88 Total Words: 21948

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	0.5%	103
● Minor Changes	0.1%	26
● Paraphrased	1.6%	356
● Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
● AI text
● Human text



Ing. Gómez Reyes, Alejandro Paúl MSc

Tutor



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “**Diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel y caudal en dos tanques para el Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE**” fue realizado por las señoritas **Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina y Ochoa Salinas, Andrea Catherine**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de agosto de 2023



.....
Ing. Gómez Reyes, Alejandro Paúl MSc

C. C. 1714913637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotras, **Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina** y **Ochoa Salinas, Andrea Catherine**, con cédulas de ciudadanía n° 1105099392 y n° 0603575002, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel y caudal en dos tanques para el Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 23 de agosto de 2023


.....

Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina

C.C: 1105099392


.....

Ochoa Salinas, Andrea Catherine

C.C: 0603575002



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotras, **Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina y Ochoa Salinas, Andrea Catherine**, con cédulas de ciudadanía n° 1105099392 y n° 0603575002, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel y caudal en dos tanques para el Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 23 de agosto de 2023


.....

Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina

C.C: 1105099392


.....

Ochoa Salinas, Andrea Catherine

C.C: 0603575002

Dedicatoria

A mi madre Paulina, que siempre ha creído en mí. Además, quién es un pilar en mi vida, y de quién siempre recibí su apoyo y confianza en toda mi etapa estudiantil.

A mi tía (Beatriz) que siempre me han brindado su apoyo durante todos los estudios y todos los ámbitos de mi vida.

Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina

Dedicó este trabajo a mi madre Betty, a mi padre Luis y mi hermana Melany por brindarme su apoyo, paciencia y amor incondicional en todo momento.

Ochoa Salinas, Andrea Catherine

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profunda gratitud y amor a mi madre, Paulina, cuyo apoyo incondicional y fe en mí han sido la columna vertebral de este viaje académico. Su sacrificio, sabiduría y aliento constante no solo han alimentado mi pasión por el aprendizaje, sino que también han sido mi faro en los momentos más desafiantes. A ella, le debo más de lo que las palabras pueden expresar, y dedico este logro como un humilde tributo a todo lo que ha hecho por mí. Gracias, mamá, por ser mi inspiración eterna.

También agradezco a mi familia, especialmente a mis tías (Beatriz y Cumandá) y mi abuelita (Isabel), que siempre me han brindado su apoyo incondicional, para cumplir con todos mis logros personales y académicos. De igual forma a mi perrita Muñeca, por acompañarme en todas las amanecidas durante la pandemia.

De igual forma, a mi compañera de tesis, Andrea Ochoa y mi tutor de tesis Ingeniero Alejandro Gómez, por acompañarme en este viaje que ha sido realizar la tesis.

Finalmente, a todos mis amigos de la ciudad de Loja.

Martínez Chiriboga, Gabriela Paulina

Agradezco a mi madre Betty, por su infinito amor cuidando de mi en cada paso que he dado porque durante toda mi vida me ha dado palabras de aliento para poder cumplir cada objetivo, además de sacrificar mucho por mi bienestar y de impulsarme a seguir mejorando cada día.

Agradezco a mi padre Luis, por estar siempre pendiente de mi cuando más he necesitado y saber aconsejarme con palabras sinceras para esforzarme y poder cumplir mis sueños.

Agradezco a mi hermana Melany, siendo la más pequeña de mi familia ha estado motivándome siempre en los buenos y malos momentos, ella es mi adoración y mejor amiga de por vida.

A mi familia y amigos con los que comparto la dicha de cumplir esta meta profesional. También a mi perrito Chester y mi perrita Perlita, los cuales han sido mis fieles compañeros en las amanecidas de estudio y mis aliados de aventuras.

A mi compañera de tesis Gabriela Martínez, por haber compartido este tiempo juntas, en el que nos apoyamos y logramos realizar este proyecto de tesis.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Alejandro Gómez por su guía y apoyo brindado en el desarrollo de esta tesis.

Ochoa Salinas, Andrea Catherine

Índice de Contenidos

Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I: Introducción	21
Antecedentes	21
Justificación e Importancia	23
Alcance	24
Componentes mecánicos.....	24
Componentes electrónicos/eléctricos.....	27
Componentes del sistema de control	28
Objetivos	29
Objetivo general.....	29
Objetivos específicos	29
Capítulo II: Fundamentación Teórica y Referencial	30
Automatización Industrial.....	30
Niveles de automatización.	31
Módulos didácticos	32
Sistemas de Control	33
Tipos de Sistemas de Control	33
Estrategias de Control	34
Fluidos.....	34
Flujo.....	36
Flujo laminar	36
Flujo turbulento	36
Número de Reynolds.	37

	10
Ecuación de Bernoulli	37
Medición de nivel.....	38
Elementos usados para la medición del nivel.....	38
Medición de caudal en líquidos	39
Medidores de flujo volumétrico.....	39
Medidores de flujo de velocidad:.....	41
Medidor de presión diferencial	41
Medidores de flujo de masa	43
Válvulas de Control de Fluidos	44
Tipos de Válvulas.....	44
Actuadores.....	45
Sistemas de tuberías.....	46
Sistemas de tuberías en serie.....	46
Sistemas de tuberías en paralelo.....	48
Descripción general de las bombas.....	49
Clasificación de las bombas	50
Bomba de desplazamiento positivo.....	50
Bomba rotodinámica	51
PLC	52
Funcionamiento	52
HMI	54
Jerarquía de las pantallas	56
Capítulo III: Diseño	59
Definición de requerimientos	60
Diseño del Sistema.....	60
Diseño del subsistema mecánico	63

Diseño de tanque de reserva	63
Diseño de tanque de control	65
Diseño de estructura metálica.....	66
Diseño del sistema de tuberías.....	74
Diseño del subsistema eléctrico y electrónico.....	81
Selección de sensores.....	81
Selección de actuadores.....	85
Selección del controlador y HMI.....	88
Selección del tablero eléctrico.....	92
Diseño del subsistema de control.....	106
Lógica de control.....	106
Tabla de variables	106
Diseño de Controladores	108
Programación del PLC.....	113
Programación de la HMI	124
Capítulo IV: Integración y Resultados	136
Integración del sistema.....	136
Construcción de sistema mecánico.....	136
Montaje de tuberías	136
Construcción del sistema eléctrico – electrónico.....	137
Elementos de cableado y construcción	138
Consideraciones técnicas de montaje e instalación para evitar las perturbaciones electromagnéticas.....	139
Calibración de los sensores de caudal	141
Verificación de funcionamiento y Resultados.....	142
Guías de Laboratorio.....	155

Guía 1. Reconocimiento de elementos del módulo didáctico	155
Guía 2. Modelo matemático del módulo didáctico	156
Guía 3. Control PID.....	157
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	158
Conclusiones.....	158
Recomendaciones.....	159
Bibliografía.....	161
Apéndices	163

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Requerimientos para la construcción del módulo didáctico</i>	60
Tabla 2	<i>Propiedades mecánicas de acero A36</i>	68
Tabla 3	<i>Datos con diferentes tamaños de malla</i>	70
Tabla 4	<i>Características generales del sensor flotador horizontal</i>	82
Tabla 5	<i>Comparación entre sensores de caudal</i>	84
Tabla 6	<i>Parámetros técnicos de la electrobomba Pedrollo</i>	85
Tabla 7	<i>Características generales de la válvula de control</i>	87
Tabla 8	<i>Características generales de las válvulas de descarga y retorno</i>	88
Tabla 9	<i>Características generales del PLC + HMI Kinco</i>	90
Tabla 10	<i>Código colores: cableado potencia</i>	105
Tabla 11	<i>Código colores: cableado control</i>	105
Tabla 12	<i>Tabla de asignación de registro de variables principales para el PLC</i>	107
Tabla 13	<i>Constantes PID</i>	113
Tabla 14	<i>Calibración de los sensores de flujo</i>	141

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diseño modelado de estructura metálica</i>	25
Figura 2 <i>Diseño CAD del módulo didáctico</i>	26
Figura 3 <i>Diseño CAD parte exterior tablero de control</i>	27
Figura 4 <i>Diseño CAD parte interna de tablero de control</i>	28
Figura 5 <i>Pirámide de Automatización</i>	31
Figura 6 <i>El flujo laminar se produce en capas sin mezclarse</i>	36
Figura 7 <i>Una obstrucción en el recipiente provoca un flujo turbulento</i>	37
Figura 8 <i>Medidor de turbina</i>	40
Figura 9 <i>Medidor de engranajes ovales</i>	40
Figura 10 <i>Tubo Pitot</i>	41
Figura 11 <i>Tipos de elementos</i>	42
Figura 12 <i>Medidor de caudal por ultrasónicos</i>	43
Figura 13 <i>Medidor Térmico</i>	43
Figura 14 <i>Medidor Coriolis</i>	44
Figura 15 <i>Ejemplo de sistema de tubería en serie</i>	48
Figura 16 <i>Ejemplo de sistema de tuberías en paralelo con tres ramas</i>	49
Figura 17 <i>Esquema de clasificación de bombas</i>	50
Figura 18 <i>Diagrama de bloques de la estructura de un PLC</i>	53
Figura 19 <i>Representación del estado con codificación redundante y uso adecuado de los colores</i>	56
Figura 20 <i>Jerarquía de pantallas HMI de alto rendimiento</i>	57
Figura 21 <i>Ejemplo de pantalla de nivel 3</i>	58
Figura 22 <i>Diagrama en V de la Norma VDI 2206 para el presente proyecto</i>	59
Figura 23 <i>Diseño preliminar del módulo didáctico</i>	62
Figura 24 <i>Tanque de reserva</i>	63

Figura 25 <i>Tanque de control</i>	65
Figura 26 <i>Diseño con componentes principales que ejercen carga</i>	67
Figura 27 <i>Distribución de cargas y puntos de apoyo en la estructura</i>	69
Figura 28 <i>Aplicación de malla con tamaño de 10mm.</i>	70
Figura 29 <i>Simulación de análisis estático de tensiones (Von Misses)</i>	71
Figura 30 <i>Simulación de trazado de desplazamiento en estructura</i>	71
Figura 31 <i>Simulación de análisis de deformación unitaria estática</i>	72
Figura 32 <i>Simulación de factor de seguridad</i>	73
Figura 33 <i>Longitudes de sistema de tubería para la corriente de flujo</i>	74
Figura 34 <i>Sensor de nivel de flotador horizontal</i>	82
Figura 35 <i>Sensor de flujo YF-S201</i>	83
Figura 36 <i>Sensor de flujo FS-400A</i>	83
Figura 37 <i>Electrobomba monofásica con rodete periférico (Pedrollo)</i>	85
Figura 38 <i>Válvula de bola proporcional modulada motorizada Kazeffi de 1"</i>	86
Figura 39 <i>Válvula de bola ON/OFF motorizada U.S. Solid</i>	88
Figura 40 <i>PLC + HMI HP070 Vista Frontal</i>	89
Figura 41 <i>PLC + HMI HP070 Vista Posterior</i>	90
Figura 42 <i>Software KincoBuilder para la programación del PLC</i>	91
Figura 43 <i>Software HPBuilder para la programación del PLC</i>	91
Figura 44 <i>Diagrama eléctrico de un optoacoplador</i>	92
Figura 45 <i>Esquema de conexión regulador de voltaje LM7805</i>	93
Figura 46 <i>Esquema eléctrico para la placa PCB</i>	94
Figura 47 <i>Caja para colocación de la placa PCB</i>	95
Figura 48 <i>Valores comerciales de interruptores magnéticos</i>	96
Figura 49 <i>Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34210 10A 2P</i>	96
Figura 50 <i>Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34106 6A 1P</i>	97

Figura 51 <i>Fusible 4A CGC</i>	98
Figura 52 <i>Portafusible 32A Ebasee</i>	99
Figura 53 <i>Fuente de alimentación de 24 VDC Mean Well</i>	100
Figura 54 <i>Transformador 110V – 24V AC</i>	100
Figura 55 <i>Contactador Bobina 110/120V AC CGC</i>	101
Figura 56 <i>Relé térmico 5.5 – 8A Ebasee</i>	102
Figura 57 <i>Relés encapsulados 8 pines – bobina 24V DC - CGC</i>	103
Figura 58 <i>Borneras</i>	104
Figura 59 <i>Características de tablero eléctrico</i>	105
Figura 60 <i>Señal de entrada</i>	110
Figura 61 <i>Señal de salida</i>	110
Figura 62 <i>Identificación de la planta: Modelo un polo</i>	111
Figura 63 <i>Identificación de la planta: Modelo dos polos</i>	111
Figura 64 <i>Respuesta de la planta en lazo abierto</i>	112
Figura 65 <i>Gráfica para encontrar L y T</i>	112
Figura 66 <i>Configuración básica del PLC</i>	114
Figura 67 <i>Configuración de las entradas analógicas</i>	114
Figura 68 <i>Configuración de las salidas analógicas</i>	114
Figura 69 <i>Selección de la ventana HSC Wizard</i>	115
Figura 70 <i>Ventana HSC Wizard</i>	116
Figura 71 <i>Configuración del contador HSC0</i>	116
Figura 72 <i>Configuración del contador HSC1</i>	117
Figura 73 <i>Configuración de HSC0 y HSC1</i>	118
Figura 74 <i>Activación de HSC0 y HSC1</i>	118
Figura 75 <i>Lectura de pulsos totales de HSC0 y HSC1</i>	118
Figura 76 <i>Lectura de pulsos por segundo de HSC0 y HSC1</i>	119

Figura 77 Valor por defecto del set point.....	119
Figura 78 Tiempo de muestreo del bloque PID	120
Figura 79 Asignación valor modo manual y valores K_p , T_i y T_d	120
Figura 80 Bloque PID.....	121
Figura 81 Compilación del proyecto	121
Figura 82 Selección del modo de simulación	122
Figura 83 Simulación del programa.....	122
Figura 84 Configuración del puerto de carga	123
Figura 85 Carga del programa al PLC.....	123
Figura 86 Monitoreo en tiempo real del PLC	124
Figura 87 Creación de nuevo proyecto en software Kinco Builder.....	125
Figura 88 Selección de modelo de HMI a usar software Kinco Builder.....	125
Figura 89 Comunicación HMI-PLC	126
Figura 90 Arquitectura de HMI.	127
Figura 91 Diseño de pantalla de Inicio.	127
Figura 92 Diseño de pantalla de Supervisión.	128
Figura 93 Diseño de pantalla de Monitoreo.	129
Figura 94 Diseño de popup ventana Status Proceso.....	129
Figura 95 Diseño de pantalla de Tendencias.....	130
Figura 96 Diseño de pantalla de Adquisición de datos.	131
Figura 97 Diseño de pantalla de Alarmas.....	131
Figura 98 Configuración de dirección y tipo de botón de emergencia.	132
Figura 99 Configuración de alarmas.	133
Figura 100 Configuración de tag para variable modo Local / Remoto.	133
Figura 101 Botón compilar en software.....	134
Figura 102 Botón Simular en software.	134

Figura 103 <i>Botón download en software.</i>	135
Figura 104 <i>Ventana KHDownload.</i>	135
Figura 105 <i>Construcción de sistema de tuberías.</i>	137
Figura 106 <i>Montaje de elementos eléctricos en tablero de control.</i>	137
Figura 107 <i>Placa PCB de circuito optoacoplador.</i>	140
Figura 108 <i>Ensamble final de módulo didáctico</i>	140
Figura 109 <i>Transformación de pulsos/s a litros/minuto en la programación</i>	142
Figura 110 <i>Pantalla de inicio al encender el sistema</i>	142
Figura 111 <i>Módulo en estado de emergencia</i>	143
Figura 112 <i>Selección de local / remoto</i>	144
Figura 113 <i>Selección modo manual</i>	144
Figura 114 <i>Ingreso de apertura de la válvula de control al 13%</i>	145
Figura 115 <i>Ingreso de apertura de la válvula de control al 50%</i>	145
Figura 116 <i>Ingreso de apertura de la válvula de control al 80%</i>	146
Figura 117 <i>Ingreso de apertura de la válvula de control al 100%</i>	146
Figura 118 <i>Puesta en marcha del modo manual</i>	147
Figura 119 <i>Modo manual: encendido de la bomba</i>	147
Figura 120 <i>Modo manual: encendido de válvula de descarga</i>	148
Figura 121 <i>Modo manual: encendido de válvula de retorno</i>	148
Figura 122 <i>Módulo en emergencia para realizar el cambio de modos</i>	149
Figura 123 <i>Selección del modo automático</i>	150
Figura 124 <i>Valores por defecto de set point de nivel y caudal</i>	151
Figura 125 <i>Selección del set point de nivel: Nivel alto</i>	151
Figura 126 <i>Selección del set point de caudal: 120 pulsos por segundo</i>	152
Figura 127 <i>Pestaña de tendencias: Set Point Caudal, 120 pulsos/s</i>	153
Figura 128 <i>Ventana de Alarmas: Tanque de reserva con nivel de agua insuficiente.</i>	154

Resumen

En el proyecto presentado se diseñó e implementó un módulo didáctico para el control de nivel y caudal en dos tanques para la realización de prácticas de laboratorio de Automatización Industrial Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con el fin de capacitar a los estudiantes de manera didáctica para que puedan corroborar con la teoría mejorando positivamente el rendimiento académico.

El proceso consta de un tanque principal o de control y uno de reserva por los cuales circula agua. Para la variable de nivel se colocan switch de nivel (interruptor magnético tipo boya), el cual poseerá un controlador on/off, se mide en el tanque de control tres niveles: nivel alto, medio y bajo; en el tanque de reserva se colocó un sensor de nivel para evitar que el tanque se quede vacío.

La medición de flujo se realizó mediante el sistema de tuberías que conecta el tanque de reserva con el de control, se instaló dos sensores de flujo utilizando controlador PID para el trayecto de 1in y el de ½in para evaluar el comportamiento en ambos tramos. El módulo didáctico cuenta con un PLC Kinco, el cual viene integrado con HMI brindando al estudiante un control, monitoreo y adquisición de datos del proceso.

Por lo tanto, se presenta su funcionalidad proporcionando dos modos de operación manual y automático. Además, se puede controlar de manera local mediante botoneras y luces indicadoras en el tablero de control y también remotamente con el uso de la HMI.

Se tuvo énfasis en seleccionar instrumentos con características industriales y siendo accesibles en costos.

Finalmente se logró obtener un módulo didáctico de fácil uso con parámetros que permitan simular una planta industrial.

Palabras clave: Caudal, nivel, controlador proporcional integral y derivativo, controlador lógico programable, interfaz humano máquina.

Abstract

In this project, a didactic module was designed and implemented for the control of level and flow in two tanks for the laboratory practices of Industrial Automation and Mechatronics at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, in order to train students in a didactic way so that they can corroborate with the theory, positively improving academic performance.

The process consists of a main or control tank and a reserve tank through which water circulates. For the level variable, a level switch (magnetic float type switch) is placed, which will have an on/off controller, three levels are measured in the control tank: high, medium and low level; a level sensor was placed in the reserve tank to prevent the tank from becoming empty.

The flow measurement was carried out through the pipe system that connects the reserve tank with the control tank. Two flow sensors were installed using a PID controller for the 1in and ½in sections to evaluate the behaviour in both sections. The didactic module has a Kinco PLC, which is integrated with HMI providing the student with control, monitoring and data acquisition of the process.

Therefore, its functionality is presented by providing two modes of operation: manual and automatic. In addition, it can be controlled locally by means of push buttons and indicator lights on the control panel and also remotely with the use of the HMI.

Emphasis was placed on selecting instruments with industrial characteristics and being affordable in cost.

Finally, it was possible to obtain an easy-to-use didactic module with parameters that allow the simulation of an industrial plant.

Key words: Flow, level, proportional integral derivative controller, programmable logic controller, human machine interface.

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

Los sistemas automatizados de control de procesos tienen como función automatizar la supervisión y ajuste de procesos de manufactura complejos para garantizar la producción constante de productos de alta calidad. Estos sistemas son utilizados en diversas industrias que operan en procesos de producción continua en masa. Su aplicación permite a un reducido número de operarios controlar una gran cantidad de procesos complejos de manera altamente eficiente.

En el ámbito industrial, se encuentran factores del proceso que pueden ser variables de influencia externa que afectan a procesos físicos o químicos. Los sistemas de control de nivel de líquido son representativos de esta categoría, encontrando una amplia aplicación en diversos sectores industriales.

La Universidad ESPE, cuenta con diversos departamentos en los que se encuentra el Departamento de Energía y Mecánica, en el cual consta la carrera de Ingeniería Mecatrónica, este mismo dispone de algunos laboratorios, entre los cuáles está el laboratorio de Automatización Mecatrónica, que permite que los estudiantes realicen prácticas de acuerdo con los conocimientos adquiridos en clases. Este laboratorio ha sido recientemente equipado con un equipo de marca FESTO, para que se realicen prácticas en lo que se refiere a temas como son: automatización, instrumentación, sistemas de control, y resolución de problemas dentro del campo de la ingeniería. El equipo FESTO MPS – PA simula procesos reales de la industria, este está compuesto por 4 estaciones diferentes, cada una que permite observar el proceso y el control de diferentes actividades, las cuáles son: filtrado (sistema de control de presión), mezclado (sistema de control de flujo), reactor (sistema de control de temperatura) y embotellado (sistema de control de llenado y nivel).

Sin embargo, debido que solo existe un equipo de esta naturaleza, los estudiantes al momento de realizar prácticas se encuentran limitados, por lo que existe la necesidad de

proponer un equipo que de forma didáctica permita al estudiante observar cómo funciona el control de nivel y caudal, donde se puedan realizar prácticas encaminadas a dar solución a problemáticas de menor escala y que permita complementar la limitación de disponer de un solo equipo.

La utilización de los laboratorios juega un papel crucial, tal como se destaca en la estructura curricular de la especialidad de Ingeniería Mecatrónica. Esto se debe a que posibilita el desarrollo de habilidades prácticas en áreas fundamentales. Estas competencias se aplican con enfoque industrial, lo que facilita el reconocimiento y la exploración de aspectos técnicos relacionados con procesos insertos en el ámbito mecatrónico.

Considerando estos datos, el proyecto actual se enfoca en la creación de un componente educativo interactivo basado en tanques, diseñado para enseñar los principios de control de nivel y flujo. Este módulo didáctico se integra en la instrucción de técnicas de automatización industrial. Para lograrlo, se lleva a cabo la recopilación de datos de variables físicas, se establecen diversos circuitos de control y se realiza el análisis lógico y analítico de las señales obtenidas.

A nivel institucional, han existido diversos proyectos sobre módulos didácticos que involucran el control de nivel y caudal como es: "Diseño e Implementación de un Sistema Modular Didáctico para Control de Nivel, Caudal y Presión para el Laboratorio de Automatización Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas". Este proyecto mencionado ha sido importante y de gran ayuda para los estudiantes de la institución. Sin embargo, este sistema modular ya no se encuentra en uso y además para el presente proyecto, se ha añadido una parte en el área de control, que el mencionado proyecto no posee. Este nuevo sistema de control a implementar realiza un control de nivel, en 3 posiciones del tanque (bajo, medio y alto) usando sensores tipo flotador, mientras que el proyecto anteriormente indicado, realiza un control de nivel usando un sensor ultrasónico. Además, el dispositivo de control que se usará será un PLC, debido a que al equipo debe usar elementos

que sean usados en la industria. El equipo está orientado para realizar los siguientes temas para prácticas de laboratorio en general como: modelación e identificación de sistemas, determinación de elementos de planta industrial, control de equipamiento de plantas industriales, diagramas de procesos industriales, sistemas secuenciales controlados por PLC, entre otros; además se desarrollará su respectivo manual.

Justificación e Importancia

Dentro del Ecuador, se encuentra vigente el Plan PGO 2021-2025, que constituye la principal orientación política y administrativa para la concepción y ejecución de la política pública en Ecuador. A través de este marco, el Gobierno Nacional llevará a cabo la implementación de las iniciativas presentadas, con el propósito de alcanzar sus finalidades y metas establecidas dentro de este se tiene. El Objetivo 7 tiene como finalidad fortalecer las habilidades de la población y fomentar una educación innovadora, abierta a la diversidad y de alta calidad en todos los niveles. El presente proyecto se alinea con este objetivo, especialmente con su política 7.2: Impulsar la actualización y mejora del enfoque educativo mediante la innovación y la aplicación de recursos tecnológicos (Secretaría Nacional de Planificación, 2021). debido a que se aplicará los conocimientos aprendidos dentro del modelo educativo establecido por la universidad, y a través de la innovación se podrá realizar el diseño e implementación de módulo didáctico que formará parte del Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica.

En base a la filosofía institucional señala que: “La entidad encuentra su razón de ser principalmente en la sociedad y las Fuerzas Armadas, y su enfoque está dirigido hacia ellas, colaborando para abordar sus requerimientos de progreso. Esto se logra a través de la investigación, la propuesta y la ejecución de resoluciones” el perfil de este proyecto contribuirá a que se plantean e implementen soluciones que permitan la construcción de un módulo didáctico, basados en la investigación del uso de sensores y actuadores, todo esto, tomando como base los conocimientos académicos que se dictan en la Universidad.

En el Departamento de Energía y Mecánica, se persigue objetivos como la excelencia académica, y un eje importante para lograrlo es contar con laboratorios que permitan que los estudiantes puedan realizar prácticas donde se ponga en marcha competencias de acuerdo con la profesión. Además, la misión de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, el plan educativo se enfoca en la formación de ingenieros mecatrónicos altamente competentes. Estos profesionales deben poseer habilidades de liderazgo, pensamiento crítico y un sólido compromiso ciudadano. La base de su educación radica en un profundo conocimiento teórico y práctico, capacitándolos para integrar y avanzar en áreas que involucran ciertos componentes, además, deben estar capacitados para seleccionar y aplicar tecnologías de manera eficiente y adecuada, contribuyendo al progreso del país. Con estas directrices, el presente proyecto permite que se pongan en acción capacidades que permitirán servir tanto a la Universidad dentro de sus laboratorios, como al estudiante al lograr que todos los conocimientos aprendidos en la carrera tanto prácticos y teóricos se pongan en marcha, al realizar el análisis del diseño y construcción de módulo didáctico para el control de nivel y flujo de tanques. Además, como medio de enseñanza para la Universidad, el equipo quedará habilitado de manera que permita emular el proceso del sistema de control de nivel de líquidos en la industria, pero también quedará disponible para que en el futuro se puedan usar sus elementos de manera modular.

Alcance

Componentes mecánicos

Se define el subsistema mecánico mediante los siguientes elementos:

Estructura: Estará definido por la construcción de una estructura metálica de dimensiones aproximadamente de 150cm x 100cm x 45cm utilizando tubo cuadrado de 40x40x1.5mm, para lo cual se necesitará soldar los tubos además de una plancha de 1500x450x3mm para la parte superior y otra de 1230x450x3mm para la parte inferior. Los dos tanques serán construidos con planchas de acrílico de 4 mm de espesor, donde el tanque de distribución(reserva) será de mayor tamaño que el tanque de control. El tanque de reserva será

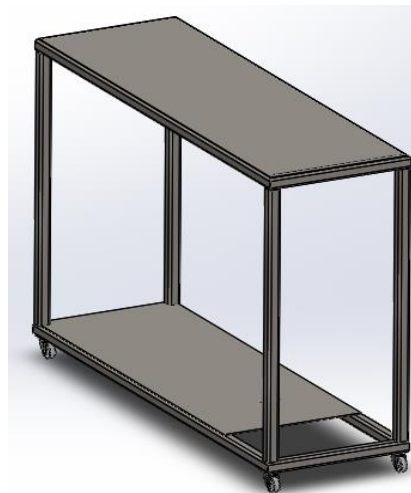
ubicado en la parte inferior, mientras que el tanque de control irá en la parte superior, junto a este será colocado el tablero de control, con medidas aproximadas de 40cm x 20cm x 60cm. Además, se colocará garruchas de 2.5" en la parte inferior de la estructura lo que facilitará su movilización.

El tanque de reserva tendrá una medida de 35cm x 35cm x 35cm, lo que resultará en un volumen total de 42875 cm^3 , sin embargo, el tanque no será llenado a su totalidad, solo hasta los 30cm, por lo que su volumen total efectivo será de 36750 cm^3 , que equivalen a 36.75 litros.

El tanque de control tendrá una medida de 20cm x 15 cm x 55cm, lo que resultará en un volumen total de 16500 cm^3 , sin embargo, el tanque no será llenado a su totalidad, solo hasta los 48cm, por lo que su volumen total efectivo será de 14400 cm^3 , que equivalen a 14.4 litros. Este dispondrá de una escala de nivel en cm en la parte frontal, que permitirá observar el cambio de nivel.

Figura 1

Diseño modelado de estructura metálica



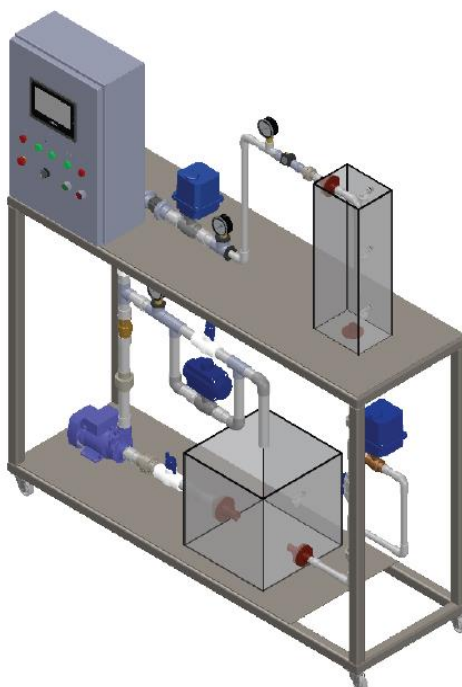
Actuadores: La conexión entre el tanque de reserva y el tanque de control se dará a través de tubería con sus respectivos accesorios. Se planifica que la tubería será de 1", en caso de ser necesario se usará reductores, estos pueden ser de 1" a 1/2", especialmente para la conexión de entrada y de salida de la bomba.

El sistema de tuberías estará compuesto por válvulas de bola que permitirán el paso y corte del agua de manera manual para facilitar la instalación, las uniones universales que facilitarán la unión entre los elementos de la tubería y de igual forma permitirá agregar o eliminar elementos de manera más sencilla, además se instalará una válvula check que asegurará que flujo del agua sea en un solo sentido. Los codos de 90° permitirán realizar el cambio de dirección de la tubería y las uniones roscadas permitirán unir los elementos de rosca externa como es el sensor de flujo, válvula de bola motorizada on/off y la válvula de control.

El tanque de reserva dispondrá de dos adaptadores de tanque que permiten obtener el agua desde él hacia la tubería de entrada de la bomba, y así el mismo el segundo permite que la conexión de descarga del tanque de control hacia él, mientras que el tanque de control dispondrá de dos adaptadores de tanque, el primero ubicado en la parte superior permitirá el ingreso del agua, y el segundo ubicado en el parte inferior del tanque, permitirá que la descarga del agua, hacia el tanque de reserva.

Figura 2

Diseño CAD del módulo didáctico



Componentes electrónicos/eléctricos

El sistema eléctrico/electrónico consta de los siguientes elementos:

Elementos de Control: Son los elementos encargados de las señales de control hacia los actuadores según su lógica programada. Se diseñará un tablero de control permitiendo la marcha y paro del equipo, además, contará con un selector para modo manual/ automático y se añadirá un botón de paro de emergencia con sus respectivas luces indicadoras. Adicionalmente se añadirán protecciones eléctricas para los circuitos, con el uso de relés y contactores para la bomba.

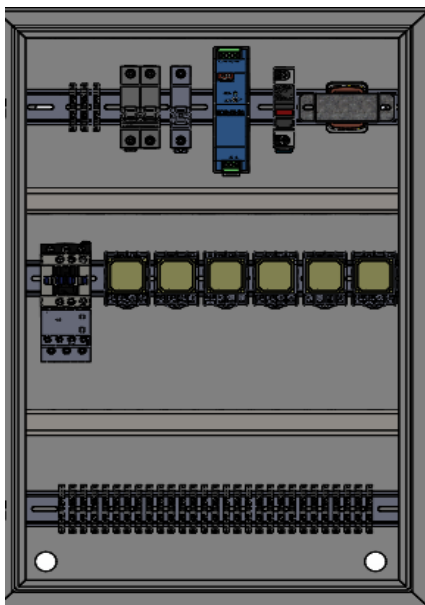
Figura 3

Diseño CAD parte exterior tablero de control.



Figura 4

Diseño CAD parte interna de tablero de control



Elementos de Potencia: Interruptores Termomagnéticos, Contactor, Relé Térmico, Fuente de Alimentación de 24 VDC, Transformador 110V AC – 24V AC, Relés Bobina 24V DC.

Actuadores: Para el llenado y vaciado de cada tanque se utilizará una válvula de bola motorizada moduladora proporcional 2 vías NPT y dos válvulas de bola On/Off motorizadas respectivamente además una bomba monofásica con rodete periférico para transportar el líquido del tanque de reserva al tanque principal.

Sensores: Sensores tipo flotador dentro de tanque de principal para los tres niveles y en el tanque de reserva se colocaría un sensor de nivel mínimo para evitar que quede vacío el tanque caso contrario el proceso se detendría. También se realizaría un circuito de acondicionamiento para el sensor de flujo.

Componentes del sistema de control

El sistema de control consta de los siguientes elementos:

- Se implementará dos controladores: un control On/Off para la variable nivel y un controlador PID para el caudal.

- Controladores: PLC Kinco HMI-PLC HP070-33DT
- Dependiendo de las señales proporcionadas por los sensores, se realizará tarjetas de acondicionamiento de las señales.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema modular didáctico para regular el nivel y caudal de agua entre dos depósitos para la realización de prácticas en el Laboratorio de Automatización e Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Objetivos específicos

- Diseñar e implementar los sistemas: mecánico, eléctrico y electrónico mediante técnicas de ingeniería junto el apoyo de software de diseño.
- Dimensionar y seleccionar los distintos sensores (nivel y caudal), actuadores (bomba y válvulas) y elementos de control necesarios para la estación.
- Implementar una interfaz que le permita al usuario modificar parámetros y visualizar el comportamiento del sistema.
- Realizar el manual del usuario y validar el funcionamiento del módulo didáctico.

Capítulo II: Fundamentación Teórica y Referencial

Automatización Industrial

La automatización industrial se basa en el uso de tecnologías como sistemas computarizados o robots mediante las cuáles se llevan a cabo procedimientos para manejar procesos industriales, reduciendo o eliminando la necesidad de intervención humana (Groover, 2016). Desde sus inicios en la Revolución Industrial, la automatización ha evolucionado de manera significativa, convirtiéndose en un componente esencial para la eficiencia de la industria 4.0.

La importancia de la automatización industrial se basa en varios factores clave. Primero, permite incrementar la productividad al reducir el tiempo necesario para realizar tareas repetitivas y minimizar los errores humanos. En segundo lugar, la automatización permite una optimización en el uso de recursos y una reducción en los costos de producción. Adicionalmente, mejora la seguridad de los trabajadores al reemplazar a los humanos en operaciones de alto riesgo.

Un sistema automatizado cuenta con tres elementos básicos: (1) la energía para realizar el proceso y operar el sistema, (2) un programa de instrucciones para dirigir el proceso y (3) un sistema de control para ejecutar estas instrucciones. Cualquier sistema automatizado debe incluir estos 3 elementos básicos.

Un aspecto central de la automatización industrial es el control de nivel y fluido de líquidos. Este es esencial en muchas industrias, como la petroquímica, farmacéutica, de alimentos y bebidas, donde el manejo de líquidos es crítico. El control preciso del nivel de líquidos en tanques y del flujo de líquidos en tuberías permite operaciones más eficientes, seguras y sostenibles.

Por ejemplo, en la industria petroquímica, un control adecuado de los niveles de líquido en un reactor puede evitar sobrellenados que pueden causar derrames dañinos y costosos. En

la industria de alimentos, la automatización del control de fluidos puede garantizar la consistencia en la calidad del producto y optimizar los procesos de producción.

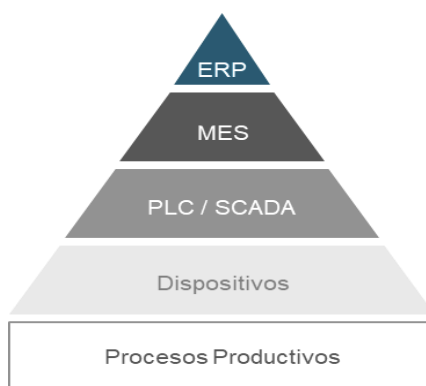
Niveles de automatización.

La norma ISA-95 es un patrón global que simplifica la unificación de todos los sistemas de información relacionados con un contexto de producción, abarcando desde operaciones empresariales hasta los sistemas de control de la planta. Este estándar, elaborado y emitido por la ISA, guarda concordancia con la norma UNE-EN 62264, estableciendo un paralelismo con la IEC 62264.

Dentro de la sección 1 de la norma (IEC 62264-1 Mod) Integración de Sistemas Empresa-Control - Parte 1: Modelos y Terminología, se presenta el estándar que detalla la estructura de la pirámide de automatización en sistemas de control industrial, tal como se ilustra en la figura 5

Figura 5

Pirámide de Automatización



Nota: Tomado de *MES: Pasado, presente y mucho futuro*, por ISA España, 2021, <https://isa-spain.org/mes-pasado-presente-y-mucho-futuro/>.

La Planificación de Recursos Empresariales (ERP) se refiere a la tarea empresarial de planificar y controlar recursos como el capital, el personal, los recursos operativos y los materiales de forma oportuna y adecuada. Un sistema de ejecución de fabricación (MES) se refiere a un nivel relacionado con los procesos de un sistema de gestión de fabricación de

varios niveles. El nivel de monitoreo, control y supervisión controla los sensores y actuadores del nivel inferior, normalmente los entornos industriales usan controladores lógicos programables (PLCs). Los dispositivos remotos de entrada/salida (E/S) leen las entradas y escriben las salidas a través de un bus de campo o una conexión de red, estos incluyen a sensores y actuadores que integran los bucles controles básicos de las unidades de control.

Módulos didácticos

Un módulo didáctico es una unidad de aprendizaje diseñada específicamente para enseñar y entrenar a los estudiantes en un área de conocimiento particular. En el caso del laboratorio de automatización e instrumentación mecatrónica, este módulo estará enfocado en el control de caudal y nivel, dos variables críticas en la industria.

El módulo didáctico constará de varios componentes que permitirán a los estudiantes experimentar con diferentes tipos de sensores, actuadores y controladores utilizados en el control de caudal y nivel.

En el campo de la automatización e instrumentación mecatrónica, es fundamental contar con un sólido conocimiento teórico y práctico de los sistemas de control de caudal y nivel. Estos sistemas son ampliamente utilizados en diversas industrias, como la química, la petroquímica y la manufacturera, donde es necesario regular y monitorear de manera precisa los flujos de líquidos y gases, así como los niveles de líquidos en tanques y recipientes.

Con el fin de brindar a los estudiantes una experiencia práctica y enriquecedora, se propone el desarrollo de un módulo didáctico dedicado al control de caudal y nivel en el laboratorio de automatización e instrumentación mecatrónica. Este módulo será una herramienta pedagógica que permitirá a los estudiantes comprender los principios fundamentales de estos sistemas y adquirir habilidades prácticas para su diseño, implementación y puesta en marcha.

Sistemas de Control

De acuerdo al libro de (Creus Solé, 2011) un sistema de control es capaz de mantener un valor de un variable en valor deseado fijo si es un proceso continuo o un valor variable con el tiempo si es un proceso discontinuo, ya que este sistema posibilita la comparación entre el valor de la variable y el valor objetivo, tomando medidas correctivas para corregir la discrepancia en función de la diferencia presente.

Los sistemas de vigilancia representan una parte esencial de la ingeniería y la tecnología modernas, permitiendo una gestión eficiente y precisa de los procesos y sistemas en una amplia variedad de campos. Según (Ogata, 2010), un sistema de inspección es un grupo de módulos que gestionan, ordenan, dirigen o regulan el comportamiento de otros dispositivos o sistemas.

Los elementos fundamentales de un sistema de control incluyen: entrada (o señal de control), sistema (o planta), salida y realimentación (Ogata, 2010). La entrada es la señal que se aplica al sistema, que es el dispositivo o proceso que se controla. La salida es el resultado del proceso controlado.

Tipos de Sistemas de Control

Sistema de Control en Lazo Abierto.

En un sistema de control en lazo abierto, la salida no afecta la operación del sistema. En otras palabras, la salida no está retroalimentada para su control y el sistema no tiene información sobre el estado de la salida (Bolton, 2013). Un ejemplo de un sistema de control en lazo abierto sería una lavadora que corre por un tiempo fijo sin tener en cuenta si la ropa está realmente limpia.

Sistema de Control en Lazo Cerrado.

En un sistema de control en lazo cerrado, la salida del sistema se retroalimenta y se utiliza para alterar el estado del sistema. Esto permite que el sistema se ajuste en tiempo real a variaciones en la entrada o en las condiciones de operación (Bolton, 2013). Un ejemplo de un

sistema de control en lazo cerrado es un termostato que ajusta el funcionamiento del sistema de calefacción en función de la temperatura medida.

Estrategias de Control

Control ON-OFF.

Esta variable es una estrategia más sencilla, donde el sistema solo tiene dos estados: encendido (ON) y apagado (OFF). El sistema cambia de estado en respuesta a la magnitud del error, sin considerar su historia o tasa de cambio (Ogata, 2010). Aunque esta estrategia es más simple y fácil de implementar, puede resultar en una operación menos suave y más propensa a oscilaciones que el control PID.

Control PID.

El control PID es una estrategia de control en lazo cerrado que combina tres acciones de control distintas: proporcional, integral y derivativa. La acción proporcional responde a la magnitud del error actual, la acción integral se acumula a lo largo del tiempo para contrarrestar errores persistentes y la acción derivativa predice el comportamiento futuro del error en base a su tasa de cambio (Åström & Hägglund, 2009). Esta combinación permite un ajuste eficiente de la respuesta del sistema a las variaciones de la entrada o las condiciones de operación.

La acción proporcional respondería a las variaciones en el nivel de agua en tiempo real, la acción integral acumularía el error a lo largo del tiempo y ajustaría la tasa de entrada o salida de agua para minimizar este error, y la acción derivativa prevería las variaciones futuras del nivel de agua en base a las tendencias actuales y ajustaría la tasa de entrada o salida de agua en consecuencia.

Fluidos

Volumen y forma.

En el estudio de líquidos, el volumen y forma tienen un enfoque especial debido a las características particulares de esta fase de la materia. La magnitud del volumen alude a la medida del espacio que un líquido utiliza dentro de un envase o receptáculo particular. En

contraste con los sólidos, los líquidos no conservan una configuración estable, sino que se ajustan a la conformación del recipiente que los resguarda.

“Los fluidos, tanto líquidos como gases, son denominados así debido a su capacidad para adaptarse a las fuerzas de cizallamiento, a diferencia de los sólidos que las contrarrestan.

Al igual que en los sólidos, las moléculas presentes en un líquido están conectadas a las moléculas circundantes, aunque con una cantidad significativamente menor de enlaces.”

(Prefacio - Física universitaria volumen 1 | OpenStax, s/f).

Compresibilidad.

Se refiere a la alteración en el volumen de una sustancia cuando se somete a variaciones en la presión. Comúnmente, se utiliza el término "módulo volumétrico de elasticidad" para cuantificar este proceso.

$$E = \frac{-\Delta p}{(\Delta V)/V}$$

Según las magnitudes ΔV y V tienen idénticas unidades, por consiguiente, el denominador de la fórmula carece de dimensiones.

Densidad.

Hace referencia a la masa contenida en cada unidad de volumen de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Caudal.

Está definido por el volumen de líquido por unidad de tiempo, el cual circula por un sistema hidráulico definido.

$$Q = V \cdot A$$

Flujo.

Se refiere al movimiento de un fluido, ya sea líquido o gas, a través de un espacio determinado. El estudio del flujo es esencial para comprender cómo los fluidos se comportan y se desplazan en diferentes situaciones y sistemas.

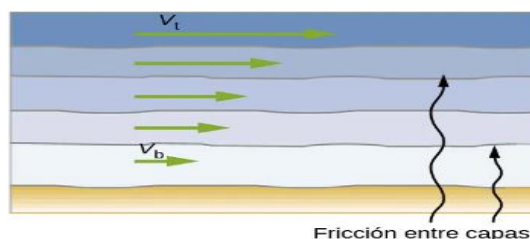
El flujo de un fluido puede ocurrir en diversos contextos, como tuberías, conductos, canales, ríos, y también en el aire alrededor de objetos aerodinámicos. El flujo puede ser impulsado por diferentes fuerzas, como la gravedad, la presión, la diferencia de concentración o la acción de una bomba o ventilador.

Flujo laminar

Se caracteriza por un movimiento suave y ordenado del fluido, donde las partículas del fluido se desplazan en capas paralelas y sin interrupciones significativas. El flujo laminar generalmente ocurre a velocidades bajas y en conductos de sección uniforme, donde las fuerzas viscosas del fluido son dominantes.

Figura 6

El flujo laminar se produce en capas sin mezclarse.



Nota: Tomado de *El flujo laminar se produce en capas sin mezclarse*, por Ling et al., 2023, <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/14-1-fluidos-densidad-y-presion>.

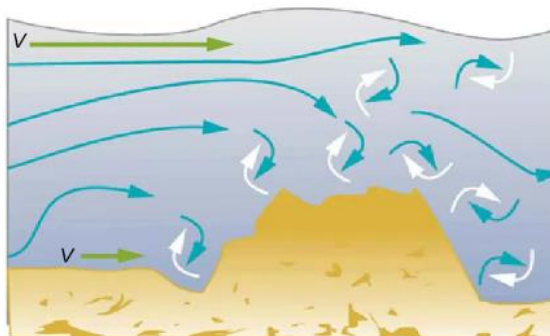
Flujo turbulento

Es un movimiento desordenado y caótico del fluido, caracterizado por remolinos, vórtices y fluctuaciones de velocidad en diferentes direcciones. En el flujo turbulento, las

partículas del fluido se mezclan y se intercambian energía de manera intensa. Este tipo de flujo se produce a altas velocidades o en presencia de obstáculos que interrumpen la trayectoria del flujo laminar.

Figura 7

Una obstrucción en el recipiente provoca un flujo turbulento.



Nota: Tomado de *Una obstrucción en el recipiente provoca un flujo turbulento*, por Ling et al., 2023, <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/14-1-fluidos-densidad-y-presion>.

Número de Reynolds.

Es un valor sin unidades empleado para caracterizar la naturaleza del flujo en un fluido alrededor de un objeto. Este número es esencial para discernir si el flujo es laminar o turbulento. Se calcula al combinar la densidad y viscosidad del fluido con la velocidad de flujo y las dimensiones de la sección transversal del flujo (Aza Saraguro & Bastidas Carlosama, 2017).

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

Ecuación de Bernoulli.

Esta ecuación es esencial para la evaluación del flujo de líquidos en sistemas confinados. En esta expresión se establece una conexión entre la presión, la velocidad y la elevación de un fluido en movimiento.

La ecuación de Bernoulli se basa en el principio de conservación de la energía, estableciendo que la energía total de un sistema se mantiene constante a lo largo de un flujo de fluido sin pérdidas de energía por fricción.

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = cte$$

Donde:

- P es la presión del fluido en un punto determinado.
 - ρ es la densidad del fluido.
 - V es la velocidad del fluido en ese punto.
 - g es la aceleración debida a la gravedad.
- h es la altura del punto con respecto a un nivel de referencia.

Medición de nivel

La medición del nivel de líquidos es un componente crítico en una variedad de contextos industriales, desde la producción de alimentos y bebidas hasta la industria petroquímica. Este campo de estudio se centra en el monitoreo y la regulación del nivel de líquidos en los recipientes de almacenamiento y procesamiento (Creus Solé, 2011).

Existen dos categorías principales de medición de nivel de líquidos: medición de nivel de punto y medición de nivel continuo (Creus Solé, 2011). La medición de nivel de punto se refiere a la detección de la presencia de líquido en un punto específico dentro de un tanque. Este tipo de medición es útil para la detección de niveles de líquido altos o bajos que podrían indicar condiciones de sobrellenado o vacío. Por otro lado, la medición de nivel continuo se refiere a la medición continua del nivel de líquido en un tanque, lo que proporciona una indicación en tiempo real del volumen de líquido presente.

Elementos usados para la medición del nivel

Diversos dispositivos se utilizan para medir los niveles de líquidos, incluyendo los medidores de desplazamiento, los medidores de flotación, los transmisores de presión

hidrostática, y los dispositivos basados en tecnología de radar y ultrasonidos (Bolton, 2021). Cada uno de estos dispositivos posee un mecanismo de funcionamiento específico y ofrece ventajas y limitaciones en términos de precisión, coste, facilidad de instalación y mantenimiento, y capacidad para tratar diferentes tipos de líquidos y condiciones operativas.

Los medidores de nivel de desplazamiento y los medidores de nivel de flotación operan en principio mecánico. Los medidores de desplazamiento utilizan un flotador y una escala de medición, y el nivel de líquido se determina midiendo el desplazamiento del flotador en la escala (Creus Solé, 2011). Los medidores de flotación utilizan un flotador que se desplaza con el nivel del líquido, y su movimiento se convierte en una señal eléctrica que puede medirse (Bolton, 2021).

Los medidores de nivel de presión hidrostática miden el nivel de líquido midiendo la presión en el fondo de un tanque, que es proporcional a la altura del líquido (Creus Solé, 2011). Los medidores de nivel de radar y ultrasonidos operan en principio electromagnético, enviando ondas de radar o ultrasonido hacia la superficie del líquido y midiendo el tiempo que tardan en reflejarse (Lipták, 2003). Estos tipos de medidores son particularmente útiles para la medición de nivel de líquidos en condiciones difíciles, como en tanques a alta presión o temperatura, o con líquidos corrosivos o viscosos.

Medición de caudal en líquidos

Medidores de flujo volumétrico

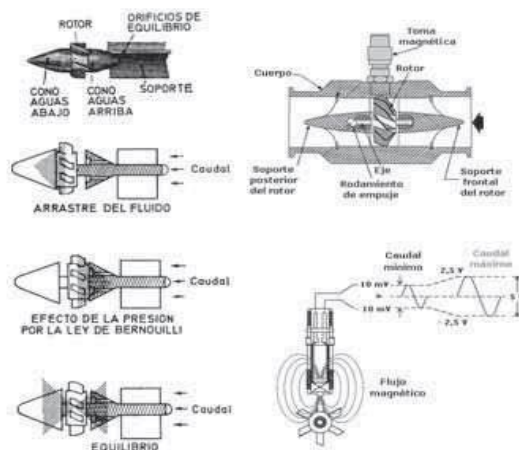
Los dispositivos de medición volumétrica determinan la tasa de flujo en términos de volumen de fluido, ya sea de manera directa mediante desplazamiento o de manera indirecta a través de deducciones o inferencias (Creus Solé, 2011).

Medidor de desplazamiento positivo: Utiliza cámaras o diafragmas para medir el volumen desplazado por el fluido.

Medidor de turbina: Mide el caudal mediante el número de revoluciones de una turbina giratoria en el flujo del líquido.

Figura 8

Medidor de turbina

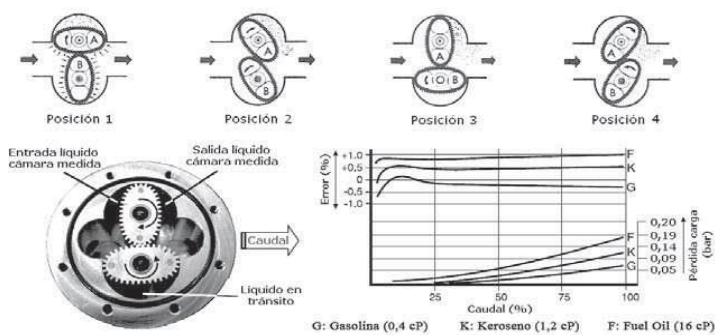


Nota: Tomado de *Medidor de turbina* (p.156), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Medidor de engranajes ovals: Utiliza dos engranajes ovalados para medir el volumen del fluido desplazado.

Figura 9

Medidor de engranajes ovals.



Nota: Tomado de *Medidor de engranajes ovals* (p.179), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

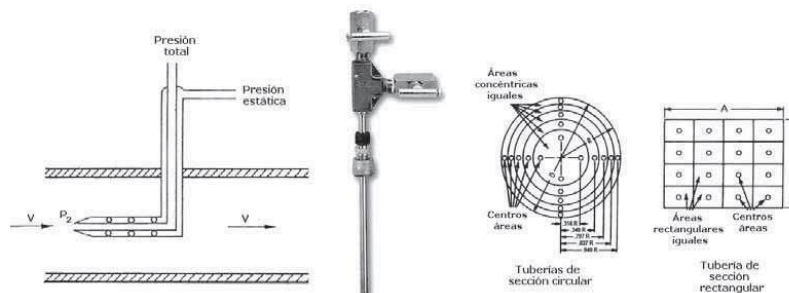
Medidor electromagnético: Emplea el principio de inducción electromagnética para medir la velocidad promedio del flujo y calcular el caudal.

Medidores de flujo de velocidad:

Tubo de Pitot: Utiliza un tubo con una pequeña abertura que se coloca en el flujo del líquido para medir la presión y, a partir de ella, la velocidad del flujo.

Figura 10

Tubo Pitot.



Nota: Tomado de *Tubo Pitot* (p.138), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Medidor de presión diferencial

Placa orificio o diafragma: El principio de funcionamiento se basa en la generación de una presión diferencial proporcional al cuadrado del caudal. A medida que el fluido fluye a través de la placa orificio, se crea una diferencia de presión entre las tomas anterior y posterior (Creus Solé, 2011). La relación entre la presión diferencial y el caudal se establece mediante ecuaciones y coeficientes de corrección específicos para cada diseño de placa orificio. A partir de la medición de la presión diferencial, es posible calcular el caudal del fluido utilizando fórmulas y calibraciones apropiadas.

Tobera: Está instalada en la tubería con dos conexiones, una en la parte frontal y otra en el centro de la sección más estrecha. Este diseño permite caudales que son un 60% mayores en comparación con los que se obtienen utilizando la placa de orificio.

Tubo Venturi: Se basa en la diferencia de presión generada por una obstrucción en el flujo del líquido y se utiliza para calcular el caudal. "Tiene una alta precisión y puede manejar fluidos con una cantidad considerable de partículas sólidas. Sin embargo, es importante

destacar que la presencia de sólidos abrasivos puede alterar la precisión de la medición” (Creus Solé, 2011).

Tubo con cuña: Consiste en un tubo que tiene una sección cónica o en forma de cuña en una parte de su longitud.

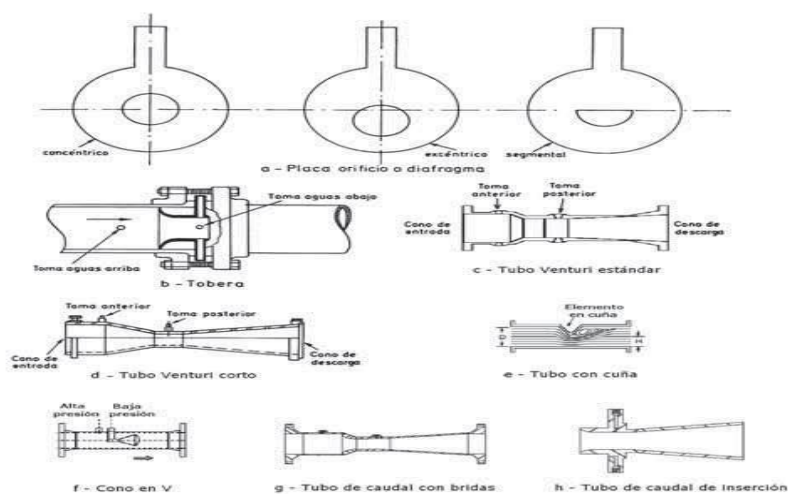
La operación de este dispositivo se basa en modificar la forma de la sección interna del tubo, lo que resulta en una variación de la presión medida entre la entrada y la zona de constricción.

Cono en V: Este dispositivo de medición está compuesto por un cono que se sitúa en el centro de la tubería, permitiendo que el fluido fluya a través de él.

Tubo de caudal: Se trata de una variante del tubo Venturi que se distingue por presentar una pérdida de carga mínima. Su nivel de precisión es del $\pm 0,5\%$, pudiendo incluso alcanzar un margen de $\pm 0,25\%$ cuando se calibra en entornos de laboratorio (Creus Solé, 2011).

Figura 11

Tipos de elementos

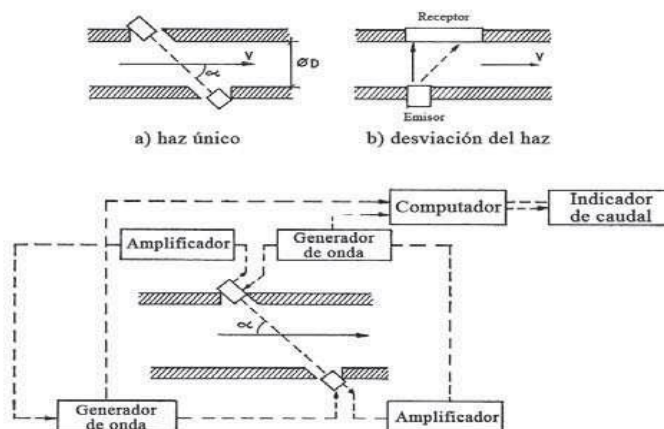


Nota: Tomado de *Tipo de elementos* (p.117), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Medidor ultrasónico: Emplea ondas ultrasónicas para medir la velocidad del flujo y determinar el caudal.

Figura 12

Medidor de caudal por ultrasónicos.



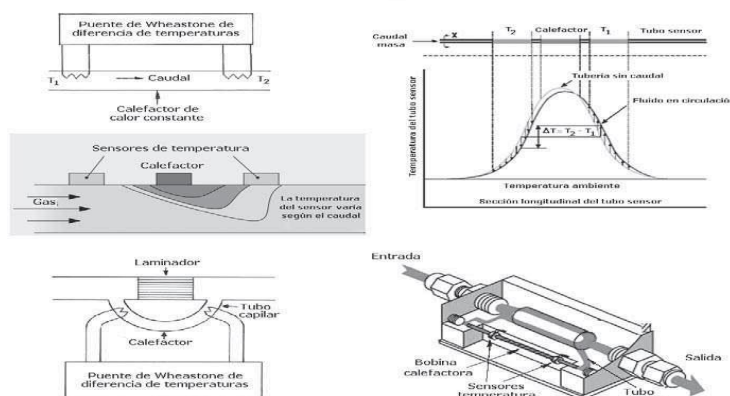
Nota: Tomado de *Medidor de caudal por ultrasónicos* (p.159), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Medidores de flujo de masa

Medidor térmico: Mide el caudal mediante el cambio de temperatura del fluido a medida que pasa por un sensor térmico.

Figura 13

Medidor Térmico

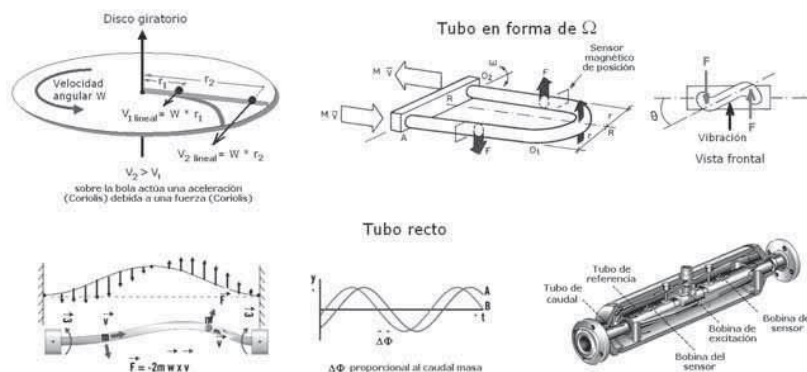


Nota: Tomado de *Medidor térmico* (p.185), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Medidor de efecto Coriolis: Mide el cambio en la frecuencia de vibración de un tubo sometido a un flujo de líquido para determinar el caudal.

Figura 14

Medidor Coriolis.



Nota: Tomado de *Medidor Coriolis* (p.191), por A. Creus Solé, 2011, Alfaomega Grupo Editor.

Válvulas de Control de Fluidos

Las válvulas son los componentes de un sistema de flujo o presión de fluidos que regulan el flujo o la presión. Estas funciones se realizan ajustando la posición del elemento de cierre en la válvula. Esto se logra mediante diversas estructuras, tales como una bola, un cuchillo, una compuerta, un globo o una compuerta deslizante, entre otros (Zappe & Smith, 2004). Además, esto puede hacerse manual o automáticamente.

Existe una amplia gama de válvulas, por lo que es fundamental comprender sus fortalezas y limitaciones. La correcta selección y uso de las válvulas pueden minimizar la inversión inicial y los costos de mantenimiento, evitando problemas imprevistos o innecesarios.

Tipos de Válvulas

Existen varios tipos de válvulas de control, de bola, de mariposa, de compuerta, de globo, de diafragma, de retención, entre otros, cada una con sus propias características y aplicaciones.

Válvulas de bola.

Son válvulas de control que utilizan una esfera(bola) rotativa para controlar el flujo de fluido. La bola tiene un orificio a través del cual el fluido fluye cuando la válvula está en posición

abierta. Cuando la válvula está cerrada, la bola se gira de manera que el orificio no esté en línea con el flujo del fluido (Dickeson, 1999).

Válvulas de mariposa.

Son válvulas de control que utilizan un disco giratorio para controlar el flujo de fluido. Cuando el disco está alineado con la dirección del flujo, la válvula está abierta y permite el paso del fluido. Cuando el disco se gira 90 grados, bloquea el flujo del fluido.

Válvulas de compuerta.

Son válvulas de control que utilizan una compuerta o cuchilla que se desliza hacia arriba y hacia abajo para controlar el flujo de fluido. Estas válvulas son útiles para aplicaciones en las que se requiere un flujo completamente abierto o cerrado y no se necesita un ajuste preciso del flujo.

Válvulas de globo.

Son válvulas de control que utilizan un disco móvil y un asiento fijo para controlar el flujo de fluido. Estas válvulas son útiles para aplicaciones en las que se requiere un control preciso del flujo, ya que el tamaño de la abertura puede ajustarse con precisión.

Válvulas de diafragma.

Son válvulas de control que utilizan un diafragma flexible para controlar el flujo de fluido. Estas válvulas son útiles para aplicaciones en las que se necesita un control preciso del flujo y se manejan fluidos corrosivos o viscosos.

Válvulas de retención.

Son válvulas de control que permiten el flujo de fluido en una sola dirección y evitan el flujo en la dirección opuesta. Estas válvulas son útiles para prevenir el flujo inverso de fluido en un sistema de tuberías.

Actuadores

Las válvulas operadas manualmente requieren la intervención directa del personal para manipular el elemento de cierre de la válvula. Sin embargo, por diversas razones, puede que el

accionamiento manual no sea práctico o posible, y se necesite una forma alternativa de manipulación. Esto se puede lograr mediante el uso de un actuador, un dispositivo adicional que, al suministrarle energía, puede operar la válvula pulsando un botón o automáticamente, dependiendo de los sistemas de proceso.

La elección de operar una válvula a través de un actuador puede estar motivada por factores como: el control del sistema de proceso, la ubicación remota o inaccesible de la válvula, los requisitos de seguridad de parada de emergencia, la necesidad de un par de torsión excesivo para operar la válvula, y la seguridad.

Los actuadores de válvulas se pueden clasificar en tres categorías, dependiendo de su tipo de acción: lineal, de giro parcial, y de giro múltiple. Cada uno de estos puede ser alimentado por una de las siguientes fuentes de energía: hidráulica, eléctrica, o neumática (Zappe & Smith, 2004).

Sistemas de tuberías

Sistemas de tuberías en serie

En los sistemas reales de circulación de fluidos es un hecho que existan pérdidas menores, tanto por causa de fricción, de acuerdo con el movimiento de un punto a otro. También puede estar presente más de un tamaño de tubería.

Un sistema de tuberías en serie se determina cuando el fluido se mueve a través de una sola trayectoria continua.

El análisis de sistemas y los desafíos de diseño llevan a su categorización en tres categorías:

Clase I: Cuando el sistema está definido por configuraciones de diámetros de tuberías, tipos de pérdidas menores y flujo volumétrico del fluido.

Clase II: Ocurre cuando el sistema satisface condiciones relacionadas con alturas, dimensiones de tuberías, válvulas, conexiones y caída de presión aceptable en puntos críticos del sistema.

Clase III: Es reconocido que, para la configuración general del sistema y el caudal volumétrico deseado, se realizará el cálculo del diámetro necesario de la tubería para transportar el flujo volumétrico específico del fluido. En el caso del sistema de tuberías en serie, se utiliza la siguiente ecuación de energía.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

En la ecuación proporcionada, los primeros tres términos del lado izquierdo representan la energía inherente al fluido en el punto 1, considerando la contribución de la carga de presión, la carga de elevación y la carga de velocidad. Por otro lado, los términos del lado derecho representan la energía del fluido en el punto 2.

El término h_A corresponde a la energía que la bomba introduce al sistema, lo cual equivale a la carga total que la bomba debe superar (Mott, 2006).

El valor h_L establece la energía global que se disipa en el sistema en cualquier punto ubicado entre los puntos de referencia 1 y 2. Diversos factores inciden en la pérdida total de energía, incluyendo:

$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6$$

Donde:

$h_L =$ Pérdida total de energía por unidad de peso del fluido en movimiento

$h_1 =$ Pérdida en la entrada

$h_2 =$ Pérdida por fricción en la línea de succión

$h_3 =$ Pérdida de energía en la válvula

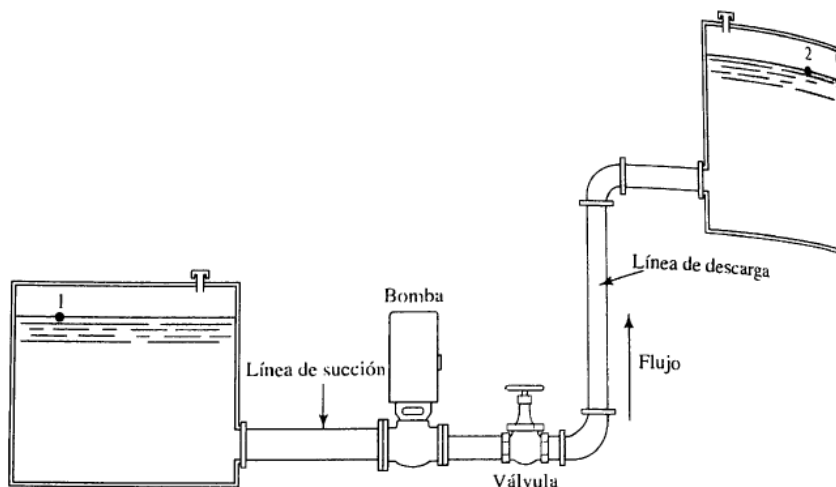
$h_4 =$ Pérdida de energía en los dos codos a 90°

$h_5 =$ Pérdida por fricción en la línea de descarga

$h_6 =$ Pérdida en la salida

Figura 15

Ejemplo de sistema de tubería en serie



Nota: Tomado de *Sistema de tubería en serie* (p.322), por R. Mott, 2006, Pearson Educación.

Sistemas de tuberías en paralelo

Son los que poseen más de una trayectoria que el fluido puede transitar para llegar de un punto de partida a otro final. Un ejemplo se muestra en la figura 16 en donde el flujo se distribuye en tres ramas que salen de una intersección y se denotan como a, b y c. Los flujos volumétricos corresponden a Q_a , Q_b y Q_c , respectivamente. Las tres trayectorias se reúnen en la parte derecha del sistema y siguen por un tubo de salida hasta el segundo punto, el cual es el final del trayecto Q_2 .

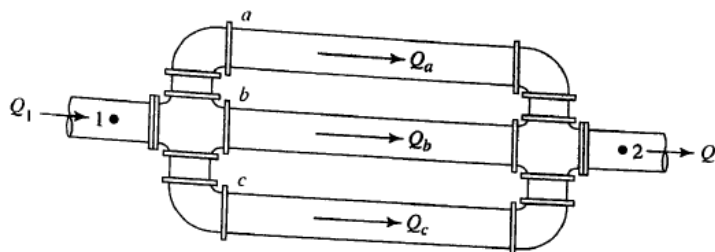
Se puede aplicar el principio de flujo estable a un sistema en paralelo llegando a la expresión siguiente:

$$Q_1 = Q_2 = Q_a + Q_b + Q_c$$

En la igualdad $Q_1 = Q_2$ se confirma el flujo estable anterior, el flujo total, flujo volumétrico es igual en cualquier sección transversal. En la parte $Q_a + Q_b + Q_c$, deben sumar el flujo volumétrico total.

Figura 16

Ejemplo de sistema de tuberías en paralelo con tres ramas.



Nota: Tomado de *Sistema de tubería en serie* (p.359), por R. Mott, 2006, Pearson Educación.

Se incluye la caída de presión a través del sistema. Hay una presión ρ_1 en el primer punto y en el segundo otra distinta ρ_2 , por lo cual se tiene $\rho_1 - \rho_2$ y se utiliza la ecuación de la energía.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Quedando al despejar $\rho_1 - \rho_2$

$$\rho_1 - \rho_2 = \gamma \left[(z_2 - z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_L \right]$$

Una vez derivada esta ecuación de energía, la disparidad de presión entre los dos puntos se encuentra definida por la disparidad en altura, en las cargas de velocidad y la pérdida de energía por cada unidad de peso del fluido en circulación en el sistema (Mott, 2006).

Descripción general de las bombas

Definición de Bomba: Una bomba funciona mediante el uso de fuerza mecánica para aumentar la presión de un líquido y empujarlo a través de una tubería o conducto. Esto funciona gracias a la acción de un rotor, pistón, paletas u otro mecanismo interno que crea un movimiento de succión y presión.

Clasificación de las bombas

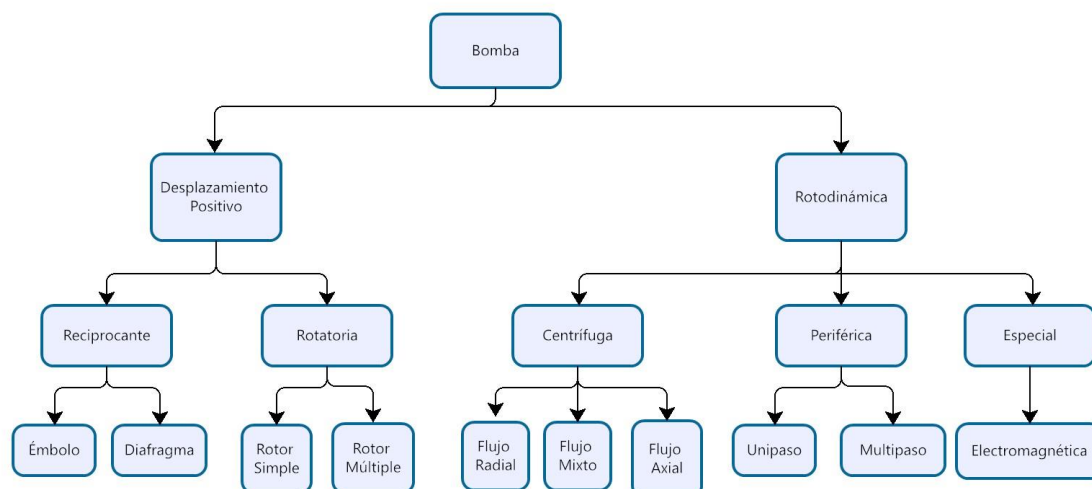
Las bombas pueden ser categorizadas basándose en sus aplicaciones, los materiales con los que se construyen y su configuración mecánica. Un factor crucial a tener en cuenta es el principio mediante el cual se infunde energía al fluido.

Por lo tanto, las bombas pueden ser agrupadas en dos conjuntos distintos:

- a) Bomba de desplazamiento positivo
- b) Bomba rotodinámica

Figura 17

Esquema de clasificación de bombas.



Bomba de desplazamiento positivo

Su funcionamiento consiste en que la cavidad de la máquina cuyo volumen está variando, está unida alternativamente al orificio de succión o al de descarga (Salazar & Hernández, 2008).

Bomba recíprocante: Estas bombas se caracterizan por su diseño simple pero eficiente, donde un pistón o émbolo se mueve hacia adelante y hacia atrás dentro de un cilindro para generar el flujo de líquido.

Una de las ventajas destacadas de las bombas reciprocantes es su capacidad para generar altas presiones y caudales. Esto las hace ideales en situaciones donde se requiere una gran fuerza para mover líquidos viscosos o densos, o cuando se necesita una presión significativa para superar obstáculos en el sistema.

Bomba rotatoria: Estas bombas se caracterizan por su diseño de rotores que giran dentro de una carcasa, creando un flujo continuo y suave de líquido. Las bombas rotatorias poseen una capacidad para manejar una amplia variedad de líquidos, desde fluidos de baja viscosidad hasta líquidos altamente viscosos.

Bomba rotodinámica

Las bombas de tipo rotativo operan al transmitir energía mediante un componente llamado rodete. Estas bombas generan un movimiento rotativo y el rodete es responsable de impartir energía cinética al fluido (Salazar & Hernández, 2008).

Bomba centrífuga: El funcionamiento de estas bombas se basa en la acción de un impulsor que gira a una velocidad determinada dentro de una carcasa (Salazar & Hernández, 2008).

Bomba periférica: Las bombas periféricas tienen un diseño con un impulsor periférico. Este impulsor está conectado a un eje y se encuentra ubicado en un canal o cámara circular cerca de la carcasa de la bomba. Al accionar la bomba, el impulsor gira a alta velocidad, generando fuerza centrífuga que impulsa el líquido hacia el exterior del impulsor y luego hacia la salida de la bomba. La velocidad de rotación del impulsor, el diseño de los canales y la forma de las aspas contribuyen a este proceso, asegurando un flujo constante y una presión adecuada para muchas aplicaciones. Su facilidad de uso y mantenimiento, junto con su precio asequible, las convierten en una solución práctica y accesible para tareas como el suministro de agua en el hogar, sistemas de riego de jardines y transferencia de líquidos en aplicaciones ligeras.

Bomba Electromagnética: Estas bombas generalmente están compuestas por un conjunto de bobinas electromagnéticas y un émbolo o pistón que se desplaza dentro de una cámara. Al activar la corriente eléctrica en las bobinas, se crea un campo magnético que atrae o repele el émbolo, generando un movimiento de vaivén.

Selección de bombas

Para elegir una bomba hay cinco pasos de acuerdo con (Salazar & Hernández, 2008):

- 1) Diagrama de la disposición de la bomba y tubería.
- 2) Determinación de la capacidad.
- 3) Carga dinámica total.
- 4) Condiciones del líquido.
- 5) Elección de la clase y el tipo.

PLC

Los PLC, son componentes esenciales en la automatización industrial y la instrumentación. Los PLC son dispositivos electrónicos diseñados para controlar procesos industriales de forma automática, siendo capaces de tomar decisiones basadas en las condiciones de entrada y ejecutar acciones específicas en los dispositivos de salida.

Un PLC puede ser programado para realizar una variedad de tareas, desde las más simples, como encender y apagar luces, hasta las más complejas, como controlar una línea de producción completa. Los PLCs son ampliamente utilizados en una variedad de industrias, incluyendo manufactura, petroquímica, farmacéutica, y muchas más. Su flexibilidad y capacidad para ser reprogramados los hacen ideales para una variedad de tareas y aplicaciones.

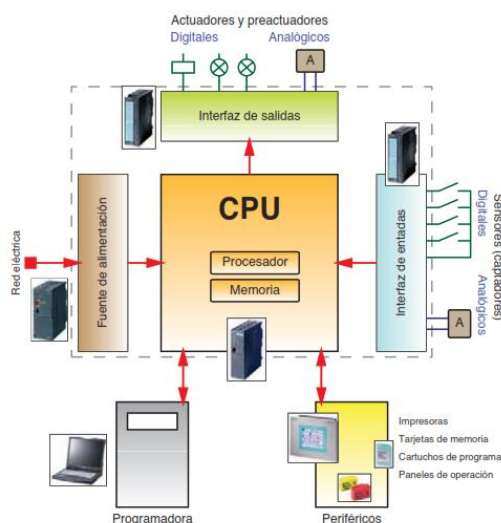
Funcionamiento

Un controlador lógico programable opera gracias a un sistema electrónico impulsado por un microprocesador que gestiona las señales de entrada y salida del entorno exterior a través de interfaces específicas. Para mantener un rendimiento constante y eficiente del

sistema electrónico, es imprescindible una fuente de energía constante. Los programas requeridos para su funcionamiento se almacenan en varias formas de memoria disponibles en el PLC y son administrados desde un dispositivo de programación externo (Martín & García, 2012).

Figura 18

Diagrama de bloques de la estructura de un PLC



Nota: Tomado de *Diagrama de bloques de la estructura de un autómata programable* (p.260), por Martín & García, 2012, Editex.

Una característica central de los PLCs es su capacidad para ser programados utilizando varios lenguajes de programación. De acuerdo con la norma IEC 61131-3, se pueden utilizar varios lenguajes para programar un PLC, incluyendo LD, ST, IL, FBD, y SFC (Bolton, 2015).

El LD es un lenguaje gráfico que se asemeja a los esquemas de circuitos eléctricos, lo que lo hace fácil de usar para aquellos familiarizados con tales esquemas. Por otro lado, ST es un lenguaje de alto nivel similar a los utilizados en la programación de computadoras y es útil para realizar cálculos complejos y manipulaciones de datos.

Los PLCs también se caracterizan por tener diferentes tipos de salidas, específicamente salidas a relé y salidas a transistor. Las salidas a relé son dispositivos electromecánicos que se

utilizan para controlar la corriente en un circuito. Tienen la ventaja de poder manejar altas corrientes, pero también tienen la desventaja de ser más lentas y estar sujetas al desgaste debido a su naturaleza mecánica (Rehg & Sartori, 2014).

Por otro lado, las salidas a transistor son dispositivos de estado sólido que también controlan la corriente en un circuito. Aunque no pueden manejar tanta corriente como los relés, son más rápidos y duraderos debido a su naturaleza de estado sólido (Rehg & Sartori, 2014).

HMI

La evolución de las interfaces hombre-máquina en sistemas de control ha pasado a los sistemas modernos que incluyen gráficos. Sin embargo, muchos de estos gráficos carecen de eficacia y contexto informativo, ya que fueron diseñados sin considerar la importancia de la representación de datos numéricos, tendencias y estados de operación. Esta falta de diseño adecuado ha llevado a la persistencia de interfaces hombre-máquina ineficaces en muchas industrias.

La justificación para la mejora de las HMI radica en la necesidad de garantizar la seguridad de los operarios y prevenir accidentes graves. La aviónica ha demostrado que el uso de tecnologías modernas en las HMI puede tener un impacto significativo en la disminución de accidentes. Es imperativo que las empresas reconozcan la importancia de actualizar sus sistemas y adoptar las mejores prácticas para mejorar la seguridad y el rendimiento en sus operaciones.

Recomendaciones para HMI de Alto Rendimiento utilizadas actualmente en la industria 4.0, de acuerdo con (Hollifield, 2021) tienen las siguientes características:

- Una representación generalmente no esquemática, excepto cuando es esencial desde el punto de vista funcional y en el Nivel 3.
- Uso limitado del color, empleando colores de manera específica y consistente.
- Fondos grises para minimizar el deslumbramiento y los problemas de reflejo.

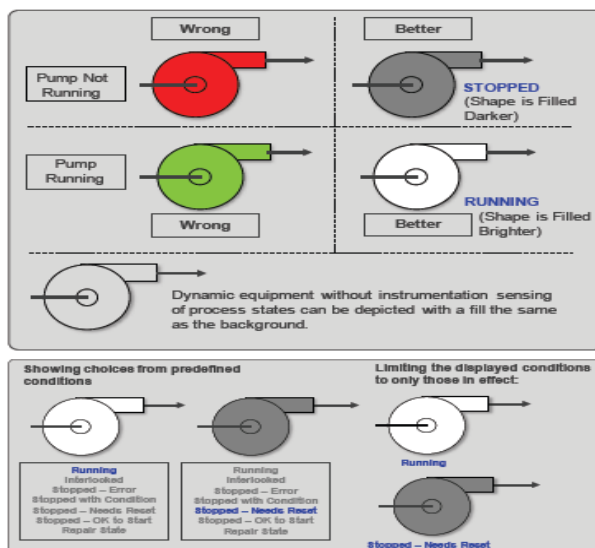
- Sin animaciones, excepto cuando se requiere una representación gráfica específica relacionada con las alarmas.
- Tendencias incrustadas y correctamente formateadas de parámetros importantes.
- Representación analógica de medidas importantes, mostrando su valor en condiciones normales, anormales, de alarma y de interbloqueo.
- Jerarquía adecuada en el contenido del gráfico, proporcionando una exposición progresiva de información detallada según sea necesario.
- Representaciones simples y directas en 2D, no en 3D.
- Representación y disposición del flujo de manera consistente para minimizar los cruces de líneas.
- Información incrustada en contexto (a través de menús de clic derecho u otros métodos similares), como documentación y justificación de alarmas, procedimientos operativos estándar, entre otros.
- Métodos de navegación lógicos y consistentes.
- Técnicas para minimizar los errores de entrada de datos del operador.
- Medidas de validación y seguridad.

En la figura 19 se muestra el uso de colores brillantes como verde y rojo para representar el estado de encendido y apagado de los equipos el cual es incorrecto. Una forma adecuada de representar este estado es utilizando el brillo relativo del objeto, donde los elementos más brillantes indican que están encendidos y los elementos más oscuros indican que están apagados. Además, se puede utilizar una palabra de valor de proceso para complementar la representación visual. Si el equipo no tiene un estado que sea detectado por el sistema de control, pero aún se desea mostrar en el gráfico, se puede representar de forma transparente al color de fondo. Es importante recordar que, si alguna de las condiciones indicadas también es una condición de alarma, se mostrará un

indicador de alarma separado junto al equipo cuando esté en estado de alarma. El uso correcto de la representación visual de los equipos dinámicos mejora la comprensión y facilita la identificación de su estado en la interfaz hombre-máquina.

Figura 19

Representación del estado con codificación redundante y uso adecuado de los colores.



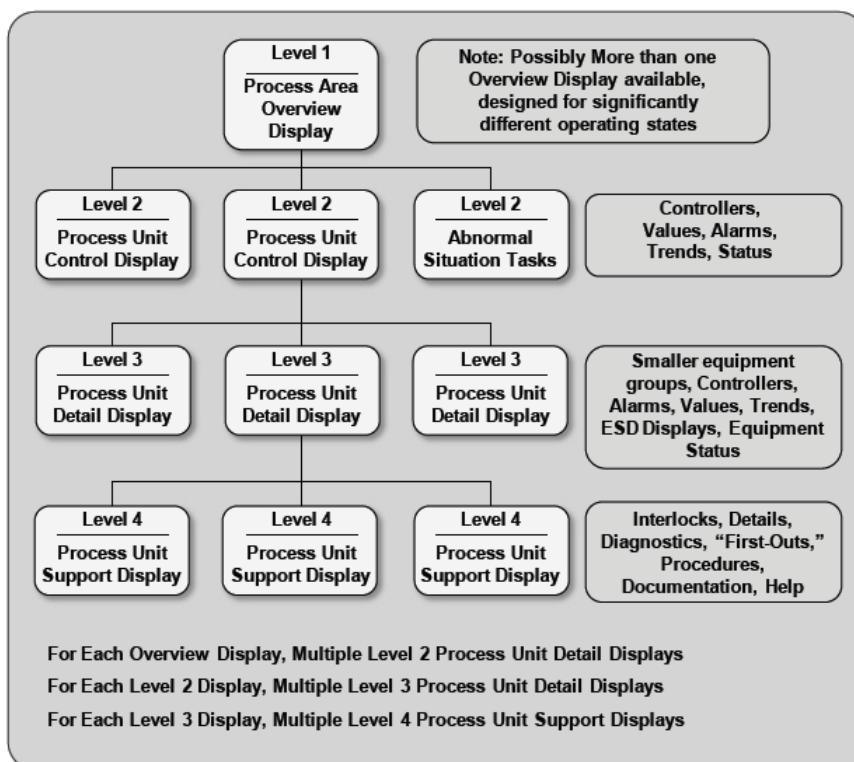
Nota: Tomado de *Depicting Status with Redundant Coding and Proper Color Usage* (p.14), por B. Hollifield, 2021, Hexagon.

Jerarquía de las pantallas

Un enfoque plano y desorganizado en el diseño de pantallas no permite una experiencia de usuario eficiente y puede dificultar la toma de decisiones informadas por parte de los operadores. Por lo tanto, es importante seguir una estructura jerárquica en el diseño de las pantallas, proporcionando una progresión ordenada y lógica de los detalles a medida que se profundiza en la información.

Figura 20

Jerarquía de pantallas HMI de alto rendimiento.

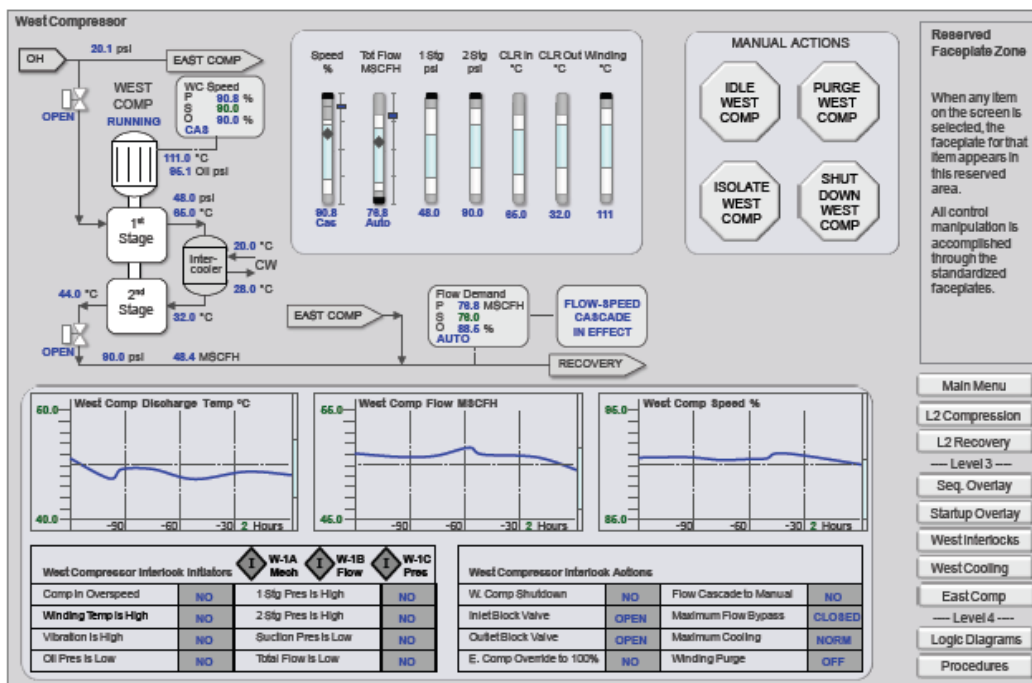


Nota: Tomado de *High Performance HMI Display Hierarchy* (p.23), por B. Hollifield, 2021, Hexagon.

En la mayoría de los casos, se opta por una representación esquemática o de tipo P&ID para los gráficos de nivel 3. Esto se debe a que este tipo de representación proporciona una visión clara estructurada de los componentes y la interconexión entre ellos. La representación esquemática permite identificar rápidamente los instrumentos relevantes y comprender su función dentro del sistema, como se observa en la siguiente figura 21.

Figura 21

Ejemplo de pantalla de nivel 3.



Nota: Tomado de *Example Level 3 Display* (p.26), por B. Hollifield, 2021, Hexagon.

Capítulo III: Diseño

Este episodio se centra en el proceso de diseño conceptual seguido para la elaboración de un módulo didáctico de flujo y nivel, tomando como guía las encomiendas de la asociación VDI. El proyecto se fundamenta en la norma VDI 2206, que establece un protocolo para el desarrollo de sistemas mecatrónicos. El uso del modelo "V" permite un diseño desde un enfoque global a uno más detallado y su posterior integración, así como una constante validación entre los requisitos y la solución propuesta. (Gausemeier & Moehringer, 2003). Este proceso se ilustra en la Figura 22.

Figura 22

Diagrama en V de la Norma VDI 2206 para el presente proyecto



Definición de requerimientos

En el listado que se muestra en la Tabla 1 se especifican las consideraciones que se deben cumplir en la elaboración del módulo didáctico de caudal y nivel.

Tabla 1

Requerimientos para la construcción del módulo didáctico

Requerimiento	Explicación
Costo - Efectividad	Debe ser económico para su implementación en un entorno universitario. Esto significa que debe diseñarse utilizando materiales y tecnología asequibles, sin comprometer su funcionalidad y eficacia.
Seguridad	Incluye el uso de componentes a prueba de fallos, la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, y la incorporación de características de seguridad como apagados automáticos y alarmas de emergencia.
Facilidad de uso	Debe ser intuitivo y fácil de usar para los estudiantes. Esto implica una interfaz de usuario clara, instrucciones de uso detalladas y la minimización de configuraciones o ajustes complicados.
Modularidad	Debe ser capaz de funcionar de manera independiente, pero también debe ser capaz de integrarse con otros sistemas si es necesario. Esto permite una mayor flexibilidad y escalabilidad, ya que los componentes individuales pueden ser añadidos, retirados o reemplazados según sea necesario sin afectar al sistema en su conjunto.

Diseño del Sistema

Para proceder a diseñar el sistema es de vital importancia conocer todos los elementos que se ven involucrados en el proceso y las funciones que le corresponde a cada uno.

Tomando en cuenta los equipos que se encuentran en el mercado, los trabajos anteriormente realizados explicados en el capítulo 1, y los requisitos presentados se estructura

que el módulo tendrá el siguiente funcionamiento: el módulo didáctico almacenará agua en un tanque de reserva, esta pasará a un tanque de control, con la ayuda de una bomba de agua. Todo el sistema está acoplado por un sistema de tuberías, por donde el agua circula, además dispondrá sensores de caudal y válvulas de control. En los tanques se dispondrá de sensores de nivel. El sistema funcionará de forma manual y automática, se establecerán valores de consigna tanto para el caudal, como para el nivel. Todos estos elementos enviarán o recibirán señales de un controlador. En caso de que exista una variación de flujo con el valor deseado, la válvula de control abrirá o cerrará su apertura de forma proporcional. Además, existirán válvulas manuales, que permitirán perturbaciones al sistema.

Con toda esta información establecida, se define la estructura de funciones que llevará el sistema del módulo didáctico, donde se dividirán en los siguientes subsistemas: mecánico, electrónico y de control.

Además, se define las funciones generales que cumplirá el sistema:

1. Almacenamiento de Agua
2. Encendido del Sistema
3. Sensado de nivel de líquido
4. Sensado de caudal
5. Selección de modo de control
6. Ingreso de valores deseados
7. Circulación de agua en el sistema
8. Variación de caudal en el sistema
9. Ingreso de perturbaciones en el sistema
10. Monitoreo de variables

El concepto inicial del diseño de módulo didáctico implica el uso de un pulsador para la marcha del sistema. Para garantizar la seguridad, se incorpora sensores magnéticos de tipo flotador horizontal para controlar el nivel de agua en un depósito de almacenamiento fabricado

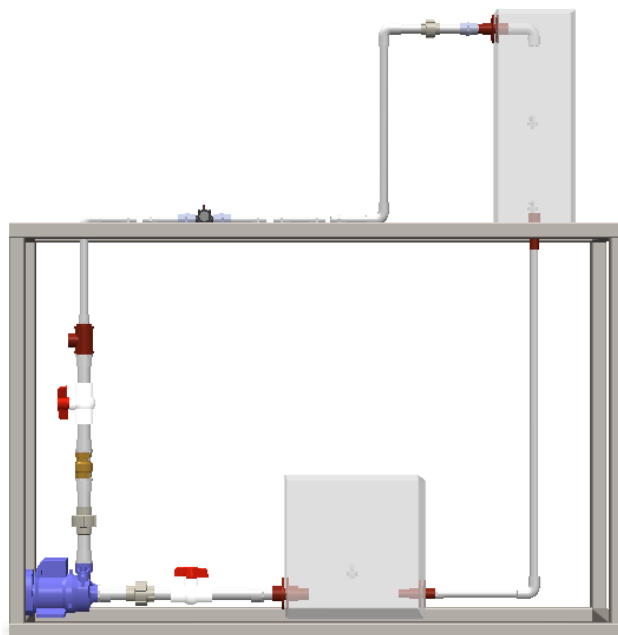
en acrílico. La selección del modo de control se lleva a cabo a través de un selector de dos posiciones, mientras que la entrada de los valores deseados se maneja mediante una interfaz HMI combinada con un PLC.

La circulación de agua dentro del sistema se logra mediante una bomba periférica, y la modificación del caudal se consigue a través de una válvula automática proporcional. Para introducir perturbaciones en el sistema, se utilizan válvulas manuales de bola. El sensor magnético de efecto Hall se emplea para medir el caudal, y los datos recogidos se utilizan para implementar un algoritmo de control PID en el PLC.

Finalmente, el PLC controla y monitoriza el valor de consigna de la variable de proceso (caudal y nivel) y permite realizar cambios en los parámetros y variables de control a través de la HMI.

Figura 23

Diseño preliminar del módulo didáctico



Resulta relevante mencionar que este diseño sirvió únicamente como punto de referencia. A lo largo del proceso de diseño y desarrollo del módulo, se introdujeron modificaciones conforme surgían nuevas necesidades de diseño mecánico o electrónico.

Diseño del subsistema mecánico

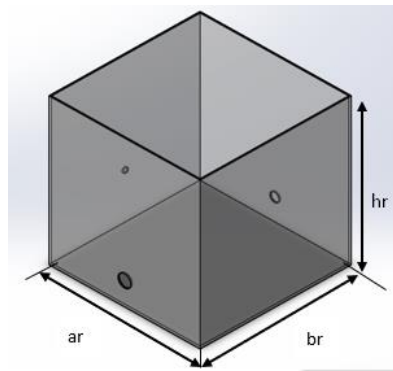
Este diseño se clasifica en 3 partes: diseño de los tanques de agua tanto para reserva como control, estructura metálica y sistema de tuberías.

Diseño de tanque de reserva

Para la elaboración de los tanques se utilizó acrílico ya que este material presenta ventajas frente a otros como: transparencia que ayuda a los estudiantes a visualizar el proceso, resistencia mecánica y es liviano para manipularlo; en el diseño del tanque de reserva se propuso las siguientes medidas:

Figura 24

Tanque de reserva



$$hr = \text{Altura tanque de reserva} = 35\text{cm}$$

$$ar = \text{Ancho tanque de reserva} = 35\text{cm}$$

$$br = \text{Largo tanque de reserva} = 35\text{cm}$$

$$er = \text{Espesor} = 4\text{mm}$$

$$vr = \text{Volumen tanque reserva} = hr * ar * br$$

$$vr = 0.35 * 0.35 * 0.35$$

$$vr = 0.0428\text{m}^3 = 42.88 \text{ l}$$

El tanque de reserva tendrá una capacidad de 42.80 litros, pero para evitar que existan desbordamientos, se decidió que el tanque se llenará hasta los 30 cm de altura, por lo que su volumen real de trabajo será de 36.75 litros.

Con la ecuación de fuerza sobre pared rectangular expresada a continuación según el libro de (Mott, 2006. p88), en donde las fuerzas máximas y presión se encuentran las paredes del tanque cuando el mismo está completamente lleno para saber su capacidad.

$$FR = \left(\gamma \frac{h}{2} \right) A$$

En donde:

$\gamma =$ *Peso específico del fluido*

$h =$ *Profundidad total del fluido*

$A =$ *Área total de la pared*

Fuerza entre las paredes br y hr

$$FRr = \left(998kg/m^3 * 9.81m/s^2 * \frac{0.30m}{2} \right) * (0.35m * 0.30m)$$

$$FRr = 154.198N$$

Fuerza entre las paredes ar y hr

$$FRr = \left(998kg/m^3 * 9.81m/s^2 * \frac{0.30m}{2} \right) * (0.35m * 0.30m)$$

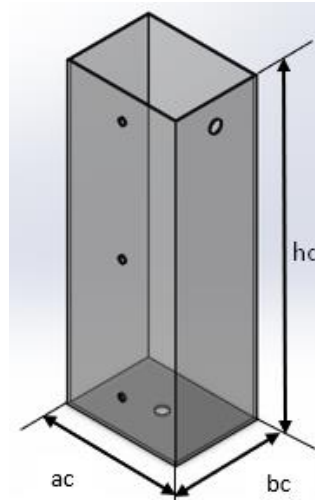
$$FRr = 154.198N$$

La máxima fuerza que soportará es de 154.198N

Diseño de tanque de control

Figura 25

Tanque de control



Para el diseño del tanque de control se propuso las siguientes medidas:

$$hc = \text{Altura tanque de control} = 55\text{cm}$$

$$ac = \text{Ancho tanque de control} = 20\text{cm}$$

$$bc = \text{Largo tanque de control} = 15\text{cm}$$

$$ec = \text{Espesor: } 4\text{mm}$$

$$vc = \text{Volumen tanque control} = hc * ac * bc$$

$$vc = 0.55 * 0.20 * 0.15$$

$$vc = 0.0165\text{m}^3 = 16.5 \text{ l}$$

El tanque de control tendrá una capacidad de 16.5 litros, pero para evitar que existan desbordamientos, se decidió que el tanque se llenará hasta los 48 cm de altura, por lo que su volumen real de trabajo será de 14.4litros.

Fuerza entre las paredes bc y hc

$$FRc = \left(998\text{kg/m}^3 * 9.81\text{m/s}^2 * \frac{0.48\text{m}}{2} \right) * (0.48\text{m} * 0.15\text{m})$$

$$FRc = 169.178\text{N}$$

Fuerza entre las paredes ac y hc

$$FRc = \left(998kg/m^3 * 9.81m/s^2 * \frac{0.48m}{2} \right) * (0.48m * 0.20m)$$

$$FRc = 225.57N$$

La máxima fuerza que soportará es de 225.57N

Diseño de estructura metálica

Se diseñará la estructura metálica con dimensiones de 150x100x45cm utilizando tubo cuadrado de 40x40x1.5mm y se soldará 2 planchas de acero, en la parte superior se colocará una plancha de 1500x450x3mm mientras que en la parte inferior de la estructura se colocará una plancha de 1230x450x3mm. Además, se dispondrá de garruchas para la movilidad de la estructura.

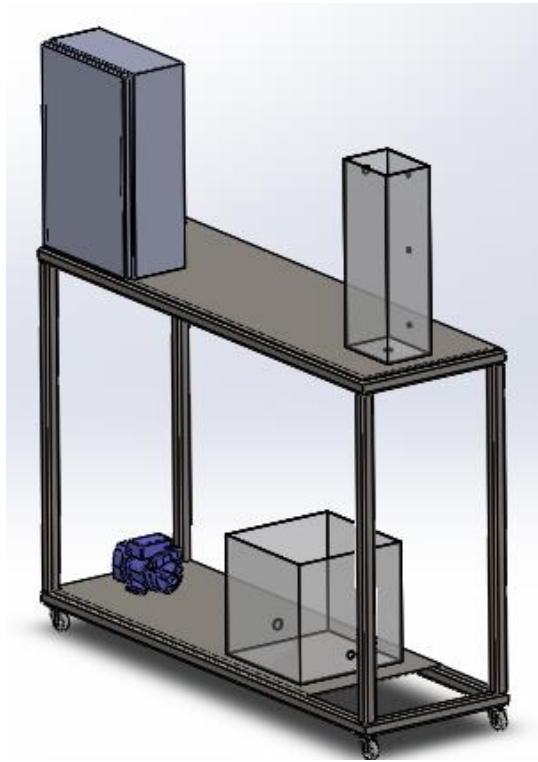
Diseño asistido por computador CAD

Mediante la ayuda del método de elementos finitos a través de simulación por el software Solidworks se analizará el comportamiento de la estructura metálica diseñada a la cual se le va a ejercer distintas condiciones de carga.

En principio se toma las medidas exactas propuestas para la estructura además se incluirá los componentes principales que ejercerá carga como es el caso de los tanques para almacenar agua, el tablero de control y la bomba periférica. Como se muestra en la figura siguiente:

Figura 26

Diseño con componentes principales que ejercen carga.



Aplicación de las cargas

La estructura metálica en la parte superior estará sometida a las cargas producidas por el tanque de control y el tablero eléctrico, mientras que en la parte inferior se encuentra sometido a las cargas correspondientes del tanque de reserva y la bomba.

Para el análisis de la parte superior se tiene las siguientes cargas:

$$\text{Fuerza platina superior} = F_{ps} = F_{Rc} + F_t$$

La carga del tablero eléctrico, el cual es de la marca beaucoup y según el catálogo de productos al ser de dimensiones 60x40x20cm corresponde a un peso aproximado de 8kg, por lo tanto, su carga corresponde a 78.48N.

$$F_t = 78.48N$$

$$F_{Rc} = 225.57N$$

$$F_{ps} = 225.57N + 78.48N$$

$$Fps = 304.05N$$

En la parte inferior estará presente la carga producida por el tanque de reserva y la bomba, la bomba tiene un peso aproximadamente de 5.2Kg según su hoja de datos, por lo cual su carga equivale a 51.012N.

$$Fb = 51.012N$$

$$FRr = 154.198N$$

Para el análisis de la parte inferior se tiene las siguientes cargas:

$$\text{Fuerza platina inferior} = Fpi = FRr + Fb$$

$$Fpi = 154.198N + 51.012N$$

$$Fpi = 205.21N$$

Primero se determina las conexiones de tipo unión rígida las cuales son los puntos de color morado que se encuentran en los extremos de los perfiles cuadrados, por otro lado, se tiene las sujeciones fijas que serán las restricciones de posición de la estructura, los cuales se encuentran en los puntos verdes en la parte inferior de la estructura. Se aplica los valores de las cargas correspondientes para la parte superior e inferior de la estructura además para realizar la simulación de análisis estático se incluye el material de acero A36.

Tabla 2

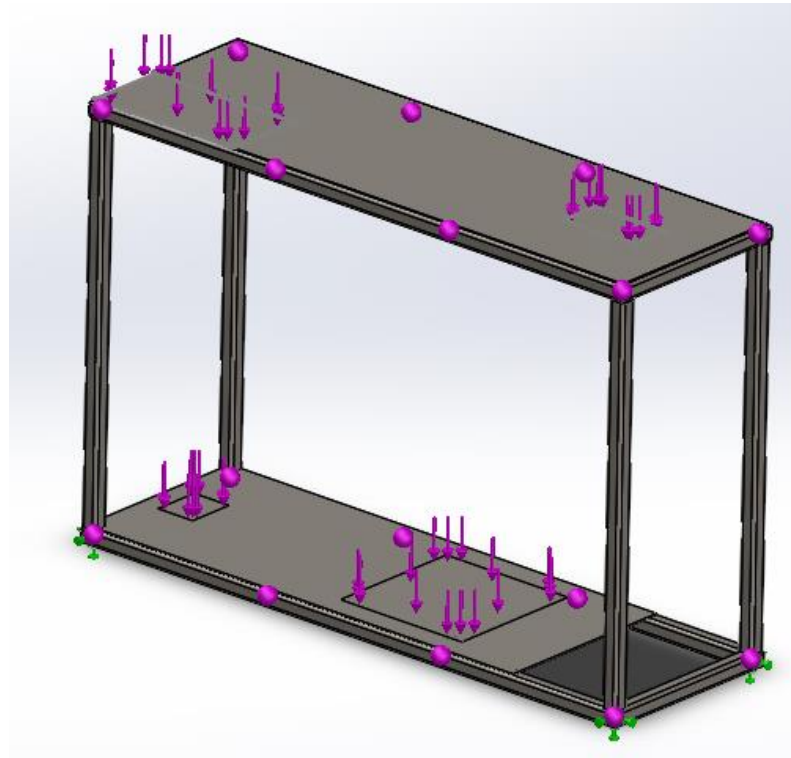
Propiedades mecánicas de acero A36

Propiedades Mecánicas de Acero ASTM A36	
Densidad (kg/m ³)	7860
Tensión de resistencia a la cedencia (MPa)	250
Cortante de resistencia a la cedencia (MPa)	145
Ductilidad porcentaje de elongación en 50mm	21

Nota: Adaptado de *Propiedades mecánicas de acero A36*, por Beer et al., 2017, RPK Editorial Services.

Figura 27

Distribución de cargas y puntos de apoyo en la estructura



Aplicación de mallado

Como siguiente paso se define el mallado ya que permite tener un resultado fiable. Para ello inicialmente se realizó mediante una malla automática tipo sólida proporcionada por el software y luego se probó con diferentes tamaños de malla, hasta identificar un punto en el cual ya no haya variación de valor de esfuerzos de Von Mises, consiguiendo los siguientes datos que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3

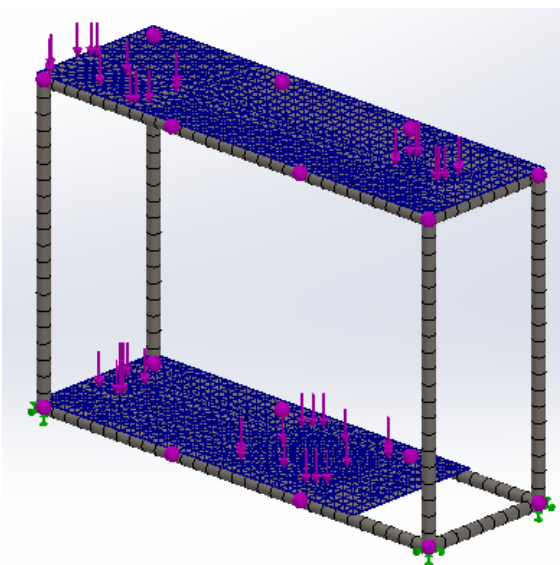
Datos con diferentes tamaños de malla.

Número	Tamaño de malla (mm)	N° de elementos	Von Mises (MPa)
1	45	6267	4.98
2	40	7431	5.04
3	35	8544	5.84
4	32.451	9720	7.66
5	30	10659	8.90
6	25	19607	10.03
7	20	28539	14.18
8	15	35979	16.51
9	12	55667	18.90
10	10	122615	19.73

Se utilizan los datos proporcionados con el tamaño de malla de 10mm ya que en este punto se estabiliza.

Figura 28

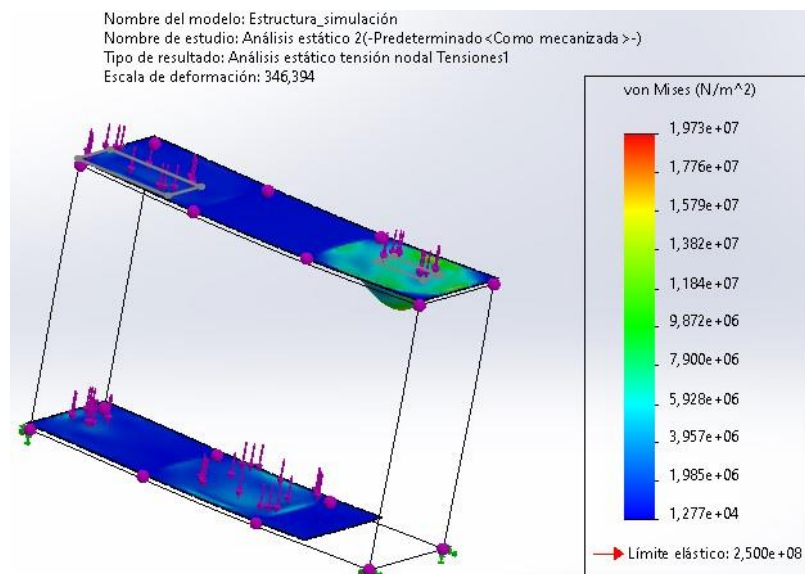
Aplicación de malla con tamaño de 10mm.



Se obtiene como límite elástico 250MPa por lo que todo valor por encima provocaría que la estructura se deformara.

Figura 29

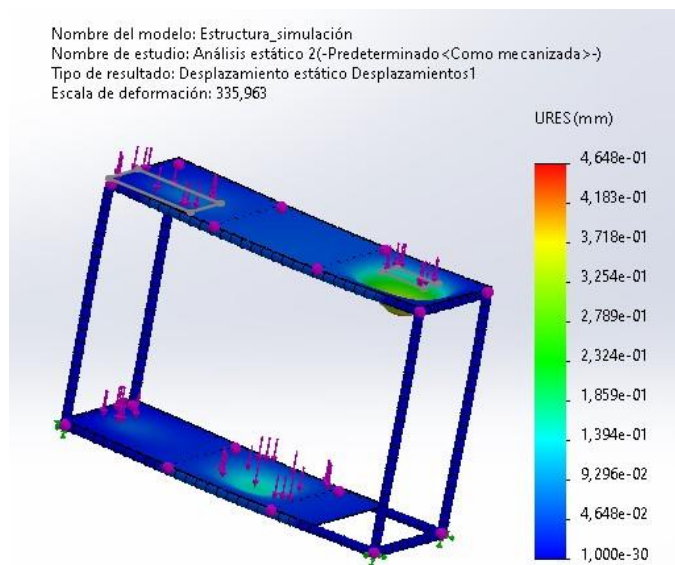
Simulación de análisis estático de tensiones (Von Misses)



El desplazamiento máximo corresponde a un valor de 0.465mm, entonces el desplazamiento es despreciable.

Figura 30

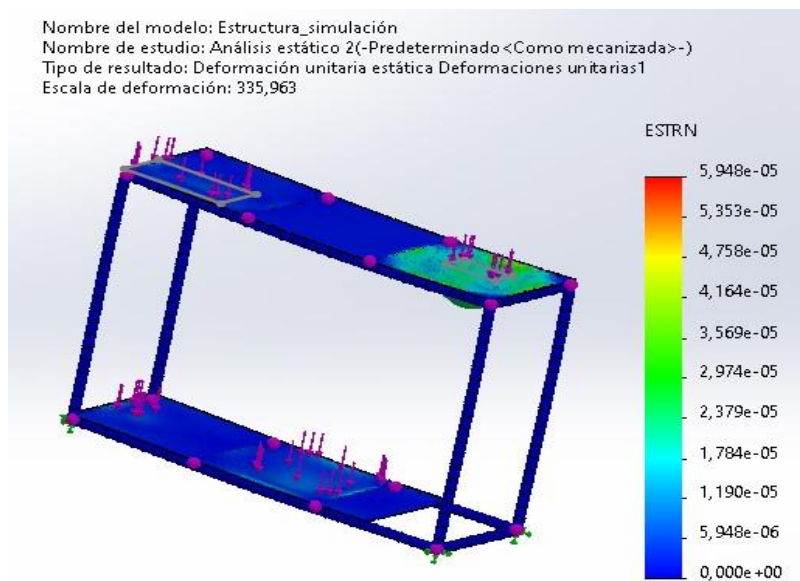
Simulación de trazado de desplazamiento en estructura.



La deformación unitaria equivalente proporciona un valor máximo de 5.98×10^{-5} , por lo tanto, sería despreciable.

Figura 31

Simulación de análisis de deformación unitaria estática.



Resultados del análisis

Se procede a analizar el esfuerzo máximo obtenido por la simulación de 19.73MPa y el límite de elasticidad del material usado que en este caso es el acero A36 siendo de 250MPa. Se concluye que el límite de elasticidad del material es mucho mayor al del máximo esfuerzo, por lo que proporcionará resistencia frente a los esfuerzos que se aplicará.

A continuación, se calcula el factor de seguridad de forma teórica con la siguiente fórmula:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_M}$$

Donde:

$FS =$ Factor de seguridad

$\sigma_y =$ Límite de fluencia de material

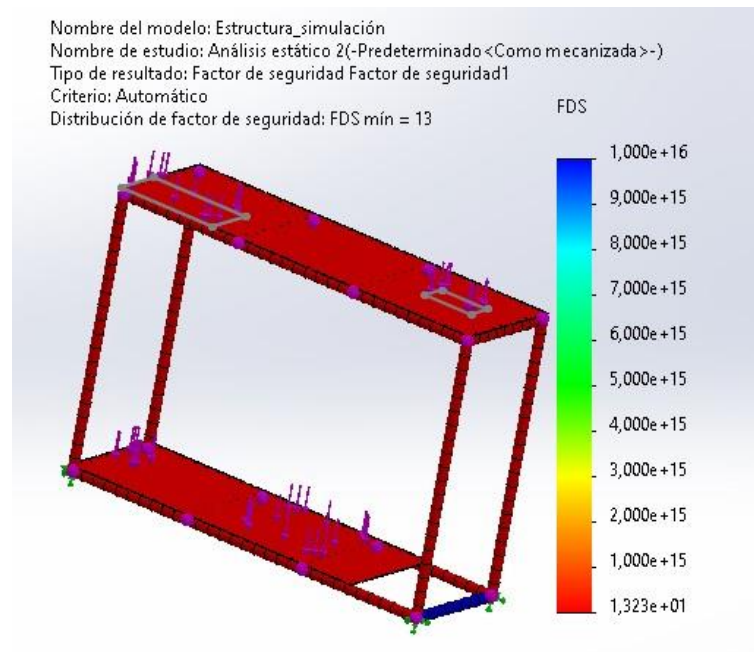
$\sigma_M =$ Esfuerzo máximo de Von Misses

$$FS = \frac{250\text{MPa}}{19.73\text{MPa}}$$

$$FS = 12.67 \approx 13$$

Figura 32

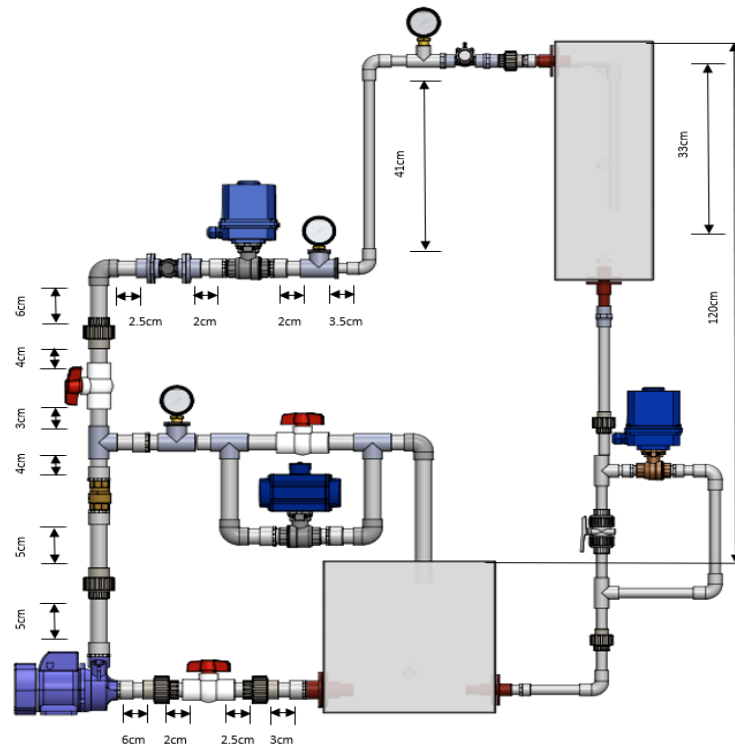
Simulación de factor de seguridad



Diseño del sistema de tuberías

Figura 33

Longitudes de sistema de tubería para la corriente de flujo



En la tubería de vaciado, siendo el valor del diámetro interno de la tubería para la sección en el tanque de control es de 15.8mm, debido a que trabajamos con tubería PVC de cédula 40 y la longitud de 33cm.

Se procede a calcular el caudal considerando el volumen del tanque respecto al de la tubería de vaciado.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{\text{Volumen del tanque} - \text{Volumen de tubería de vaciado}}{\text{tiempo de llenado}}$$

$$Q = \frac{(0.0144 - \pi * (7.65 * 10^{-3})^2 * 0.33)m^3}{30s}$$

$$Q = 4.779 * 10^{-4} m^3/s \approx 28.674 L/min$$

Cálculo para selección de bomba

El objetivo del funcionamiento del proceso es que el agua del tanque de reserva sea conducida hacia el tanque de control.

Primero se calcula la potencia mínima requerida para la bomba considerando los elementos de tubería y accesorios.

Partimos utilizando la ecuación general de energía:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

De la ecuación se puede simplificar tomando como punto de referencia el primer punto se elimina z_1 ya que toma valor de cero, la velocidad en el primer punto al reducir el nivel por el tamaño del tanque tiende a cero durante el funcionamiento de la bomba y por último las presiones de los puntos inicial y final serán equivalentes ya que son tanques abiertos solo contarán con la presión atmosférica por lo que se anularán. La ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$h_A - h_L = z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Lo siguiente que se calcula son las pérdidas.

Pérdida a la salida de tanque de reserva

$$h_L = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

h_L = Valor de pérdidas

K = Coeficiente de resistencia

V = Velocidad en el punto de interés

g = Gravedad

La velocidad a partir del tanque de reserva se calculará con el diámetro interno de la tubería de 26.3mm y el valor de caudal que ya se calculó.

$$Vr = \frac{Q}{A}$$

$$Vr = \frac{4.779 * 10^{-4} m^3/s}{\pi * (0.01315)^2 m^2}$$

$$Vr = 0.879 m/s$$

Pérdida en salida de tanque de reserva

Considerando que el tanque es grande y la tubería se proyecta dentro, por lo cual se utilizará un coeficiente de resistencia de $k=1$ (Mott, 2006. p293).

$$h_L = 1 * \frac{(0.879 m/s)^2}{2 * 9.81 m/s^2}$$

$$h_L = 0.0394 m$$

Pérdidas en tubería de 1 pulgada

Primero se evaluará el número de Reynolds con la siguiente fórmula según el libro (Mott, 2006. p.230)

$$\text{Número de Reynolds} = N_R = \frac{vD\rho}{\eta}$$

En donde:

$v =$ Velocidad de flujo (m/s)

$D =$ Diámetro interno de la tubería (m)

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m^3)

$\eta =$ Viscosidad del fluido ($Pa * s$)

Para la viscosidad del fluido según (Mott, 2006.p.589), que corresponde a las propiedades del agua tomando como temperatura ambiente $20^\circ C$, lo cual corresponde como viscosidad de fluido de $1.02 * 10^{-3} Pa * s$. Si $N_R < 2000$, el flujo es régimen laminar, si $2000 < N_R < 4000$ es imposible predecir que flujo existe entonces se denominará región crítica; por otro lado cuando $N_R > 4000$ el flujo es régimen turbulento según (Mott, 2006. p.231).

$$N_R = \frac{0.879 m/s * 0.0263 m * 998 kg/m^3}{1.02 * 10^{-3} Pa * s}$$

$$N_R = 22619.083(\text{flujo turbulento})$$

Pérdida de carga provocada por la fricción en tubería

Tenemos la ecuación de Darcy según (Mott, 2006. p.233) que se muestra a continuación:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$$h_L = \text{Pérdida de energía debido a la fricción} \left(N * \frac{m}{N}, n, lb - \frac{pie}{lb} \text{ o pies} \right)$$

L = Longitud de la corriente del flujo (m o pies)

D = Diámetro de la tubería (m o pies)

v = Velocidad promedio del flujo (m/s o pies/s)

f = Factor de fricción (adimensional)

Para determinar la pérdida por fricción primero se debe determinar el factor de fricción con ayuda de la rugosidad relativa y número de Reynolds, de acuerdo con (Mott, 2006. p.235).

$$\varepsilon_R = \frac{D}{\varepsilon}$$

ε_R = Rugosidad relativa

D = Diámetro interno de la tubería (m)

ε = Rugosidad de la tubería/material(m)

De acuerdo con el libro de (Mott, 2006. p.235), la rugosidad de la tubería de plástico dada en los Valores de diseño de la rugosidad de tubos es $3.0 * 10^{-7}m$.

$$\varepsilon_R = \frac{0.0263m}{3 * 10^{-7}m}$$

$$\varepsilon_R = 87666.67$$

Para encontrar el factor de fricción en flujo turbulento según (Mott, 2006. p.242) se tiene la fórmula siguiente:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7\varepsilon_R} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

En donde:

f = Factor de fricción

ε_R = Rugosidad relativa

N_R = Número de Reynolds

Reemplazando los valores tenemos:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 * (87666.67)} + \frac{5.74}{11785.597^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0.0296$$

Por lo tanto, se calcula la pérdida de carga provocada por la fricción en tubería de 1 pulgada:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$L = (0.03 + 0.025 + 0.02 + 0.06 + 0.05 + 0.05 + 0.04 + 0.03 + 0.04 + 0.06 + 0.025 + 0.02 + 0.02 + 0.035 + 0.41)m$$

$$L = 0.915m$$

$$h_L = 0.0296 * \frac{0.915m}{0.0263m} * \frac{(0.879m/s)^2}{2 * 9.81m/s^2}$$

$$h_L = 0.041m$$

Pérdidas en codos

Inicialmente se debe calcular el coeficiente de resistencia y después la pérdida en los codos de 90°.

La fórmula de coeficiente de resistencia se encuentra en el libro de (Mott, 2006. p.296) y se describe de la siguiente manera:

$$k = \left(\frac{Le}{D}\right) * f$$

En donde:

$k =$ Coeficiente de resistencia

$\frac{Le}{D} =$ Relación entre longitud equivalente (longitud de tubería recta)

y el diámetro interno de la tubería.

$f =$ Factor de fricción en la tubería a la que se conecta la válvula o acoplamiento.

Se tienen tres codos utilizados para el transporte de agua del tanque de reserva hacia el tanque de control se realiza el cálculo. Por lo que se tiene el mismo material y misma sección transversal el valor del factor de fricción se utilizará el mismo que se calculó anteriormente.

Se ocupa $k = 30f$ dado para codos de 90° como se indica en (Mott, 2006. p.296) .

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0296 * 30 * \frac{(0.879m/s)^2}{2 * 9.81m/s^2}$$

$$h_L = 0.0349m * 3 = 0.104m$$

Pérdida en válvula de bola

Este tipo de pérdidas se incluye como pérdidas por accesorios por lo tanto se requiere la longitud equivalente en diámetros de tubería Le/D como se indica en (Mott, 2006. p.297).

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0296 * 150 * \frac{(0.879\text{m/s})^2}{2 * 9.81\text{m/s}^2}$$

$$h_L = 0.175\text{m}$$

$$h_L = 0.175\text{m} * 4 = 0.699\text{m}$$

Pérdida en Te

Este tipo de pérdidas se incluye como pérdidas por accesorios por lo tanto se requiere la longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D (Mott, 2006. p.297).

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0296 * 20 * \frac{(0.879\text{m/s})^2}{2 * 9.81\text{m/s}^2}$$

$$h_L = 0.0233\text{m}$$

$$h_L = 0.0233\text{m} * 3 = 0.0699\text{m}$$

Se suman las pérdidas a continuación:

$$h_{LT} = 0.0394\text{m} + 0.041\text{m} + 0.104\text{m} + 0.699\text{m} + 0.0699\text{m}$$

$$h_{LT} = 0.9533\text{m}$$

Ahora se procede a calcular la altura que debe trabajar la bomba con la ecuación general de la energía simplificada.

$$h_A - h_{LT} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_A - 0.9533\text{m} = 1.2\text{m} + \frac{(0.879\text{m/s})^2}{2 * 9.81\text{m/s}^2}$$

$$h_A = 2.193\text{m}$$

Finalmente se calcula la potencia mínima para la bomba con la siguiente ecuación expresada según el libro de (Mott, 2006. p207):

$$P = \frac{h_A * \rho * g * Q}{\varepsilon}$$

Donde:

$P = \text{Potencia de la bomba (W)}$

$h_A = \text{Altura de la bomba (m)}$

$\rho = \text{Densidad de fluido (kg/m}^3\text{)}$

$Q = \text{Caudal (m}^3\text{/s)}$

$\varepsilon = \text{Eficiencia de la bomba según (Mott, 2006. p. 208)}$

$$P = \frac{2.193m * 998kg/m^3 * 9.81m/s^2 * 4.779 * 10^{-4}m^3/s}{80\%}$$

$$P = 12.823W \approx 0.01719HP$$

Diseño del subsistema eléctrico y electrónico

Selección de sensores

Sensor de nivel. Se selecciona el sensor de nivel flotador horizontal, este será colocado tanto en el tanque de control como en el de reserva. En el tanque de reserva será colocado como indicador de nivel bajo, irá colocado a 10cm del extremo inferior del tanque. En el tanque de control, irán colocados tres de estos sensores, estos serán para el nivel bajo, medio y alto. El primero sensor irá colocado a 15 cm del extremo inferior del tanque, y los 2 siguientes tendrán una separación de 20 cm.

Este sensor funciona como un interruptor flotante, diseñado para determinar la cantidad de líquido en un tanque. El sensor está compuesto por un interruptor y un flotador magnético de láminas encapsulado en una barra guía. A medida que el nivel de líquido varía, el flotador se mueve, cuyos imanes internos interactúan con el interruptor de lámina magnética, permitiendo así identificar la posición del nivel de líquido para su control.

Este sensor posibilita la detección de si el agua ha alcanzado un cierto nivel. Además, dispone de un aislamiento eléctrico a prueba de agua. Este tipo de sensor es conocido como interruptor flotante o boya de nivel y se puede integrar fácilmente con procedimientos digitales como Arduino, PIC o PLCs. Funciona de manera similar a un interruptor y debe conectarse a un

ingreso digital con su pertinente resistencia pull-up o pull-down. Para su instalación, se lo coloca de manera horizontal en un orificio en la pared del tanque.

Figura 34

Sensor de nivel de flotador horizontal



Nota: Tomado de *Sensor de nivel de flotador horizontal*, por Naylamp Mechatronics – Perú, 2023, <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/84-sensor-de-nivel-de-liquido-horizontal.html>.

Las características generales del sensor se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 4

Características generales del sensor flotador horizontal

Características generales	
Voltaje Máximo	100 V DC/AC
Carga máxima	10W
Presión máxima	0.6 MPa
Rango de Temperatura	-30° a 140°C
Resistencia pull-up	1k Ω

Sensor de caudal. Se seleccionan dos sensores de flujo: uno para la tubería de 1/2" y otro para la tubería de 1". El primero servirá como elemento de medición para realizar el control, y el segundo para realizar la comparación de valor de caudal entre ambas tuberías.

Los caudalímetros YF-S201, FS300A, FS400A son frecuentemente empleados en diversas situaciones debido a la importancia de medir el caudal en muchos procesos. En este caso se selecciona el sensor YF-S201 para la tubería de 1/2" y el sensor FS-400A para la tubería de 1". Estos dispositivos son elegidos debido de acuerdo con su tabla de datos (Tabla

9), trabajan en los rangos de caudal, con los cuáles trabaja la bomba, y son de precio accesible en el mercado.

Figura 35

Sensor de flujo YF-S201



Nota: Tomado de *Sensor de flujo YF-S201*, por Naylamp Mechatronics – Perú, 2022, <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html>

Figura 36

Sensor de flujo FS-400A



Nota: Tomado de *Sensor de flujo FS-400A*, por Naylamp Mechatronics – Perú, 2023, <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/233-sensor-de-flujo-de-agua-1-fs400a.html>

Estos son dispositivos de medición compatibles con plataformas como Arduino, Pícs, Raspberry y PLCs. El aparato tiene tres conexiones: un cable rojo para la alimentación (VCC: 5VDC), un cable negro para la tierra y un cable amarillo para transmitir las salidas de pulsos del sensor de efecto Hall.

Estos dispositivos operan de la siguiente manera: el flujo de agua que entra al sensor hace girar una turbina, que a su vez está acoplada a un imán. Este movimiento induce a un sensor de efecto Hall que genera un pulso eléctrico que puede ser interpretado por una entrada digital de un Arduino o un PLC. El sensor de efecto Hall se mantiene aislado del agua para asegurar su integridad y su funcionamiento en estado seco. Debido a que el volumen de líquido correspondiente a cada pulso es constante y conocido, se puede deducir el caudal contabilizando el valor de pulsos por unidad de tiempo (segundo o minuto) y multiplicando este número por el volumen por pulso conocidos. Con una calibración adecuada, el sensor tiene la capacidad de lograr una precisión de hasta el 10%.

La diferencia entre ambos sensores se encuentra en sus rangos de medición como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 5

Comparación entre sensores de caudal

	FS-400A	YF-S201
Voltaje de trabajo	4.5V – 24V DC	
Máxima corriente de trabajo	15mA (5V DC)	
Capacidad de carga	10mA (5V DC)	
Salida	5V TTL	
Rango de Flujo	1 – 60 l/min	1 – 30 l/min
Tubería (Rosca externa)	1"	½"
Presión de trabajo máxima	1.2 MPa	1.75 MPa
Factor de conversión	4.8	7,5
Pulsos por litro	280	450

Para calcular el flujo de agua en litros por minuto, se puede utilizar la siguiente ecuación:

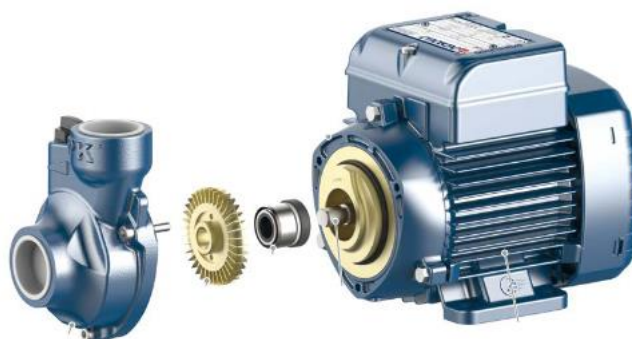
$$\text{Flujo de agua (L/min)} = \text{Pulsos del sensor (Hz)} / \text{factor de conversión}$$

Selección de actuadores

Bomba de agua. Tras calcular la potencia efectiva en el sistema, que resultó ser de $0.017[Hp]$ en este caso, se procedió a escoger la bomba de agua. Dado que no fue posible encontrar una bomba monofásica con esa potencia, se decidió elegir entre las bombas más vendidas y con una potencia más cercana a la requerida. Por lo tanto, se seleccionó una bomba monofásica con rodete periférico de $\frac{1}{2}$ Hp de la marca Pedrollo (PKm 60-MD), como se ilustra en la Figura 37; sus características técnicas se aprecian en la Tabla 6 y esta satisface de forma adecuada las demandas del sistema.

Figura 37

Electrobomba monofásica con rodete periférico (Pedrollo)



Nota: Tomado de *Bomba Periférica PKM-60*, por Pedrollo,

https://www.pedrollo.com/public/allegati/PK_ES_60Hz.pdf

Tabla 6

Parámetros técnicos de la electrobomba Pedrollo

Características técnicas	
Modelo	PKm 60 -MD
Caudal (Q)	5 – 60 l/min
Altura (H)	29 – 5 m
Altura máxima (H max)	30 m
Temperatura máxima (t max)	60° C
Voltaje (V)	110 V AC

Frecuencia (f)	60 Hz
Potencia (W)	0.37 kW – 0.5 HP
Corriente Nominal (In)	6.5 A
Protección IP	X4

Válvula de Control. Se selecciona una válvula de control proporcional que irá colocada en la tubería de 1". La válvula está compuesta por 2 partes: el cuerpo el cuál este fabricado en latón de 1/2", y actuador electrónico que es un motor capaz de abrir y cerrar la válvula de manera proporcional según lo indicado por la señal de control. El funcionamiento de válvula es como una válvula de bola común, sin embargo, su junta interna es en forma de V, lo que permite mejor control del fluido y además que el control sea proporcional. La válvula tiene una salida que permite la retroalimentación que permite conocer la posición actual, y por lo tanto conocer su apertura. El modelo de la válvula pertenece a la marca Kazeffi como se observa en la Figura 38 y sus características se pueden observar en la Tabla 11.

Figura 38

Válvula de bola proporcional modulada motorizada Kazeffi de 1"

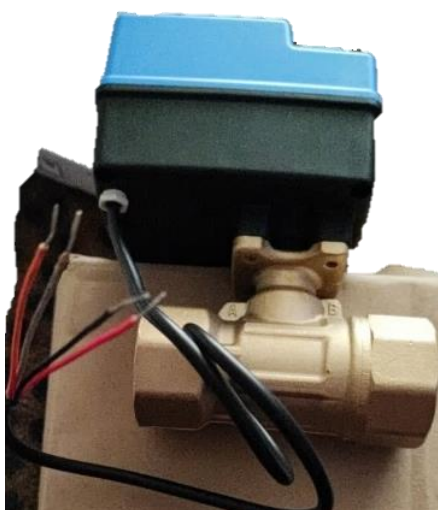


Tabla 7*Características generales de la válvula de control*

Características técnicas	
Modelo	KBM0324-225YF
Voltaje de operación	24V AC
Frecuencia	60 Hz
Torque	3.5 N.m
Tiempo de recorrido	30 – 40 segundos
Potencia	2 W
Señal de control	4(0) – 20 mA / 0(2) – 10 V DC
Señal de retroalimentación	0(2) – 10 V DC
Ruido	< 45 dB
Grado de protección IP	IP54
Temperatura de trabajo	-40° – 50° C
CV	11
Presión Nominal	2.0 MPa

Válvulas de Descarga y Retorno. Para poder realizar la descarga de agua desde el tanque de control hacia el tanque de reserva se usa una válvula de bola que posee un actuador mecánico que es un motor que permite el cierre y la apertura, pero a diferencia de la válvula de control, esta válvula solo tiene 2 estados: abierto o cerrado. La válvula de retorno funciona con el mismo principio, pero por otro lado esta permitirá que el agua regrese directamente al tanque de reserva cuando la válvula de control se cierre por debajo del límite indicado. La válvula de descarga se instala en la tubería de ½" y la válvula de retorno instala en la tubería de 1". Las válvulas pertenecen a la marca U.S. Solid y las características se observan en la Tabla 12.

Figura 39

Válvula de bola ON/OFF motorizada U.S. Solid

**Tabla 8**

Características generales de las válvulas de descarga y retorno

Características técnicas		
	Válvula de descarga	Válvula de retorno
Modelo	USS-MSV00010	USS-MSV00018
Torque	2 N.m	
Tiempo de cierre / abertura	3 – 5 s	
Voltaje	9 – 24 V DC	
Potencia	5 W	
Grado de protección IP	IP65	
Presión Máxima	1.0 MPa	
Rango de Temperatura del Flujo	0° - 90° C	
Tubería (Rosca)	1/2"	1"

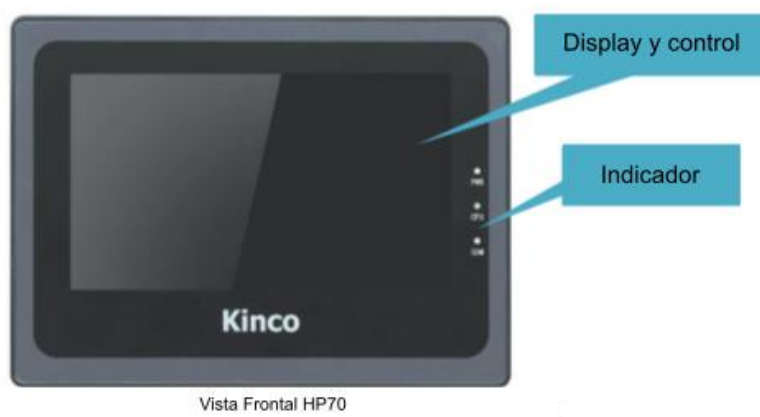
Selección del controlador y HMI

Para el proyecto se requiere un PLC robusto y con capacidad para manejar múltiples entradas y salidas, tanto digitales como analógicas. De las opciones evaluadas, se seleccionó el PLC Kinco HMI-PLC HP070-33DT, que cumple con los requerimientos técnicos, principalmente en lo que es la lectura de las señales tanto digitales como analógicas, que enviarán los dispositivos al sistema.

Una de las ventajas de este modelo, es que viene integrado con una pantalla HMI, lo que lo convierte en un equipo más compacto. Además, proporciona facilidades en la programación y sus softwares son gratuitos en la página del proveedor. El PLC trabaja con el software KincoBuilder, este usa lenguaje Ladder para su programación y la interfaz general del programa se visualiza en la Figura 42. Por otro lado, la HM trabaja con el software Kinco HPBuilder, este ofrece una variedad de elementos como es la visualización de datos, inserción de elementos como botones, animaciones y gráficos, la interfaz general se puede observar en la Figura 43. Además, este equipo permite que la programación tanto del PLC como de la HMI se da por el mismo puerto que corresponde a USB 2.0.

Figura 40

PLC + HMI HP070 Vista Frontal

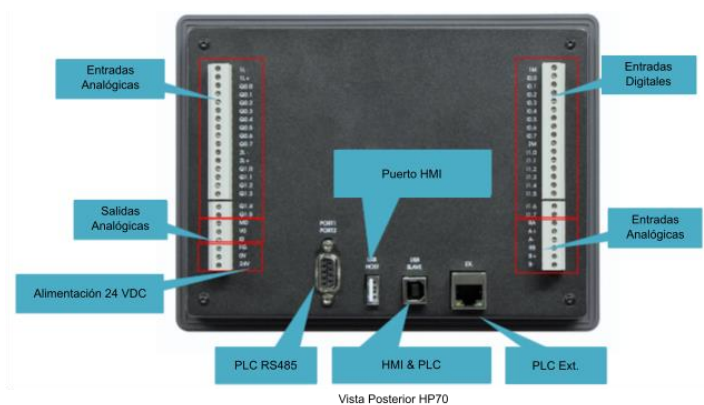


Nota: Adaptado de *Manual HP070-33DT*, por Kinco Automation,

https://en.kinco.cn/Download/D_enUserManual/PLC/Kinco_enUserManual%20for%20HMI-PLC%20202008.zip

Figura 41

PLC + HMI HP070 Vista Posterior



Nota: Adaptado de *Manual HP070-33DT*, por Kinco Automation,

https://en.kinco.cn/Download/D_enUserManual/PLC/Kinco_enUserManual%20for%20HMI-PLC%20202008.zip

Tabla 9

Características generales del PLC + HMI Kinco

Características generales	
PLC	
Voltaje de Trabajo	DC 24V
Entradas/Salidas Digitales	16 entradas * 24 VDC
	14 salidas Transistor
Entradas/Salidas Analógicas	2 entradas * (Voltaje o Corriente)
	1 salida * (Voltaje o Corriente)
Puerto de programación	USB 2.0
Tamaño	204 x 150 x 38.55 mm
HMI	
Tamaño LCD	7" TFT
Resolución	800*480
Color	65536
Panel touch	4 líneas, web de resistencias (4H)
Memoria	128M Flash + 32M DDR
Descarga de programación	1 USB

Figura 42

Software KincoBuilder para la programación del PLC

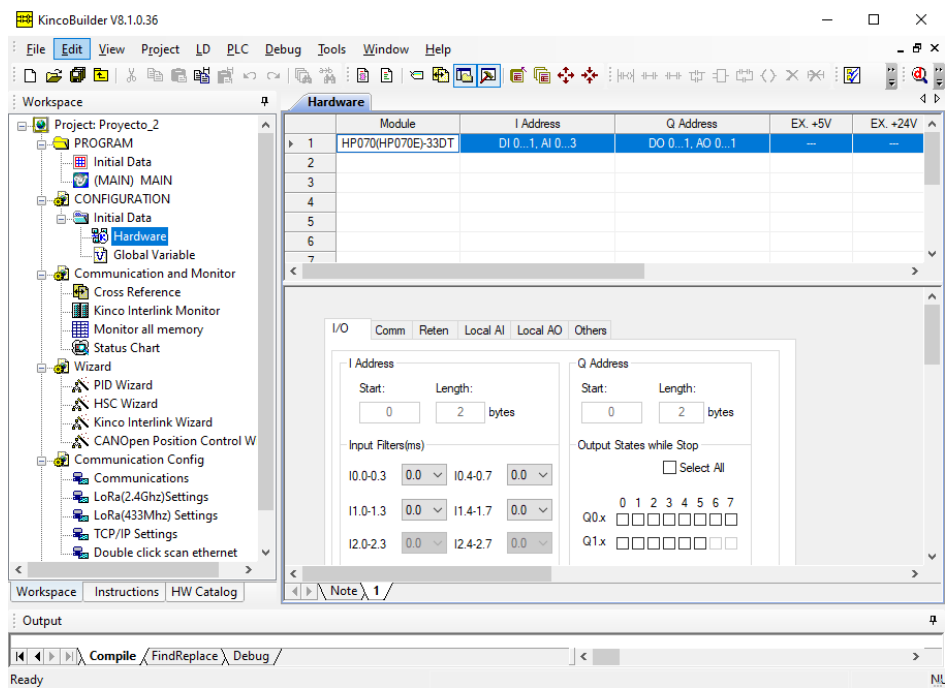
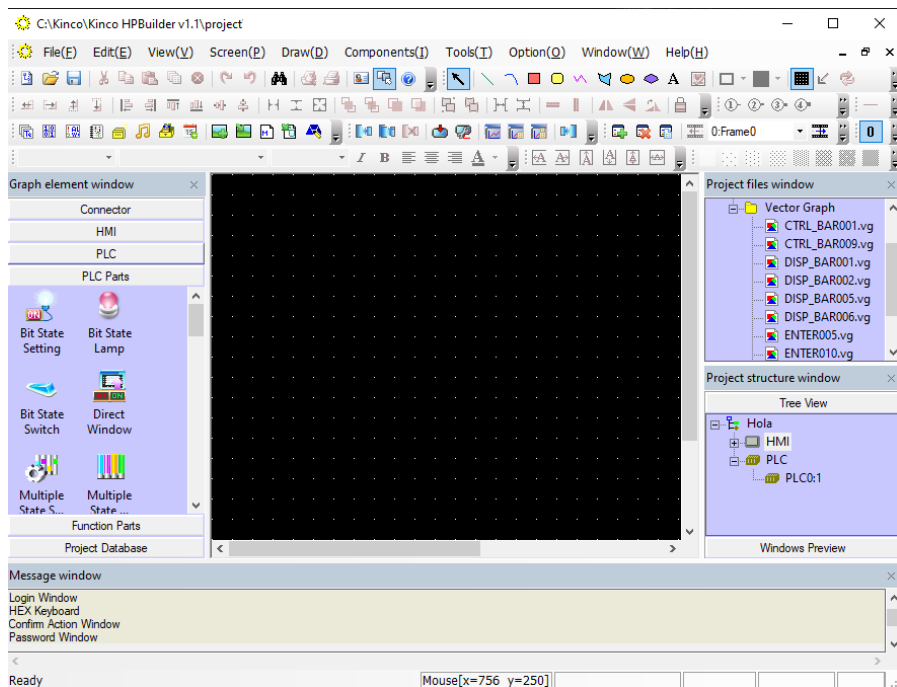


Figura 43

Software HPBuilder para la programación del PLC



Selección del tablero eléctrico

Teniendo definidos todos los elementos que se usarán en el módulo didáctico (sensores y actuadores), se procede a elegir los elementos de alimentación, potencia y/o seguridad que se necesitan para realizar la elaboración del tablero eléctrico del módulo didáctico.

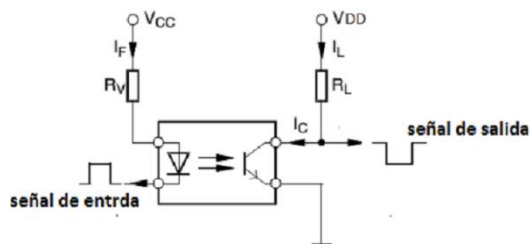
Dimensionamiento de Elementos.

Diseño de la Placa PCB. Se diseña una placa PCB para los sensores de caudal YF-S201 y FS-400A, debido a que la señal de control que entregan es un tren cuadrado de pulsos de 5V, y el PLC-HMI Kinco HP070 en su hoja de datos, indica que el voltaje máximo para la lógica 0 es 5V DC y el mínimo voltaje para lógica 1 es 11V. Por lo que se procede a usar un optoacoplador PC817 para lograr que la señal pase de 0 – 5 V DC a 0 – 24 V DC, o al menos cumpla con los valores máximos y mínimos de voltaje que nos indica el PLC y mantenga la misma frecuencia ya que esta es necesaria para conocer los valores de caudal. Además, debido que los sensores se alimentan comúnmente con 5V DC, también se procede a usar un regulador de voltaje LM7805.

El optoacoplador se lo usa en su región de saturación, lo que permite obtener 0 y 1, en este caso 0 o 24 V DC desde una señal de entrada. Para esto, se debe lograr que la intensidad luminosa del led del optoacoplador sature la base del fototransistor y este logre pasar de la región de corte a la de saturación.

Figura 44

Diagrama eléctrico de un optoacoplador



Nota: Tomado de *Diagrama eléctrico de un optoacoplador*, por Soluciones Sergio, 2019, <https://electronicabasica00.blogspot.com/2019/02/uso-del-opto-acoplador-pc817.html>

Observando la hoja de datos del optoacoplador PC817, sabemos que:

$$V_F = 1.2 V$$

$$I_F = 20 mA$$

$$V_{CE}(sat) = 0.1 - 0.2 V$$

Sabemos que $V_{DD} = 24 V$, por lo tanto:

$$R_L = \frac{V_{DD} - V_{CE}(sat)}{I_L}$$

I_C es la corriente del colector y debe ser menor a 5mA, e I_L es la corriente que pasa por la carga esta siempre debe ser menor que I_C . Para $V_{CE}(sat)$ se toma como máximo el valor de 0.5v, con estos valores tenemos lo siguiente:

$$R_L = \frac{(24 - 0.5)V}{5 mA} = 4700 \Omega$$

Para R_V , se sabe que la corriente máxima de operación del diodo que es de 20mA, se toma un valor menor que son 5mA y la señal de entrada tendrá una amplitud máxima de 5V, que es el valor máximo que nos entregan los sensores de caudal, por lo que se tiene:

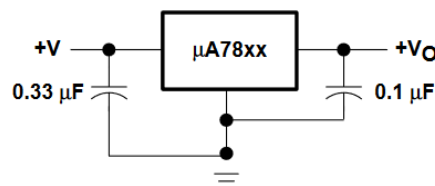
$$R_V = \frac{(5 - 1.2)V}{5 mA} = 760 \Omega$$

Se toma un valor comercial para R_V que corresponde a 820 Ω .

Como ya se mencionó, los sensores se alimentarán con 5V DC, por lo que se toma el esquema eléctrico descrito en la hoja del fabricante del LM7805, para realizar esa conexión.

Figura 45

Esquema de conexión regulador de voltaje LM7805



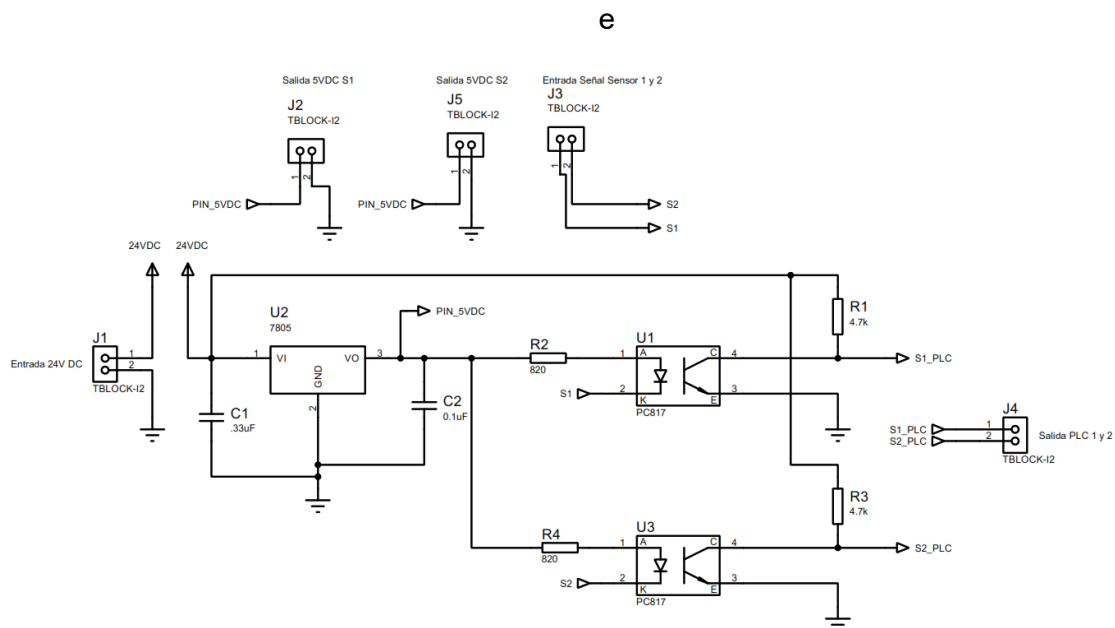
Nota: Tomado de Hoja de Datos LM7805, por Texas Instruments, 2004,

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>

Con esto realizado se procede a realizar el esquema de conexión final, y posteriormente el diseño de la placa PCB.

Figura 46

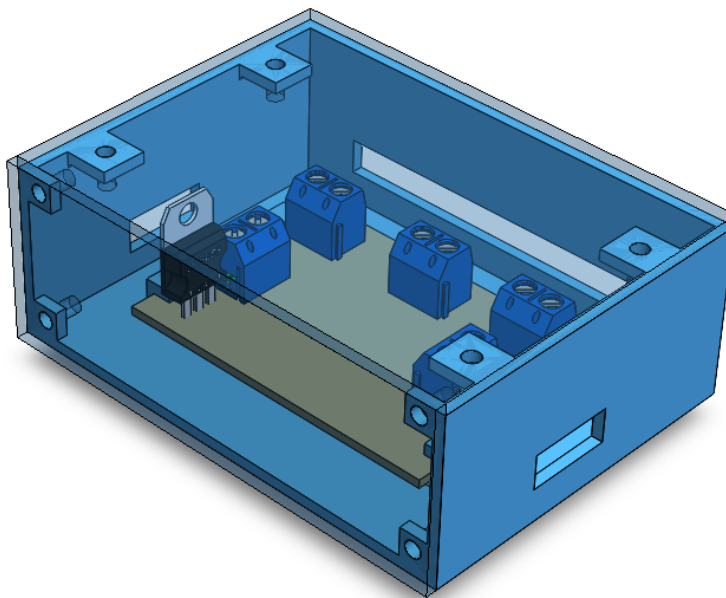
Esquema eléctrico para la placa PCB



La placa PCB tiene medida 60 x 41.5 mm con un espesor 1.5mm. Además, para evitar que quede expuesta a la intermperie, se procedió a realizar el diseño de una caja para poder colocarla, y así no sufra de ningún daño. La caja fue hecha mediante impresión 3D en material de PLA.

Figura 47

Caja para colocación de la placa PCB



Interruptor termomagnético. Es un componente de seguridad eléctrica que ha sido diseñado para salvaguardar un circuito eléctrico contra posibles daños originados por sobrecargas o cortocircuitos. Utilizan un bimetálico para detectar sobrecargas (componente termo) y un electroimán para detectar cortocircuitos (componente magnético). Cuando detectan una de estas condiciones, interrumpen automáticamente el flujo de corriente eléctrica. Se eligen dos interruptores: uno para el circuito de control y otro para el circuito de potencia.

Para el circuito de potencia, se tiene la conexión de bomba, esta es una bomba monofásica a 110 V AC, 60 Hz con un corriente nominal de 6.5A, usando un factor de seguridad de 1.25 tenemos lo siguiente:

$$6.5A \times 1.25 = 8.125 A$$

Observando el catálogo general de Schneider Electric, tenemos la tabla de valores de comerciales cómo se observa en la Figura 48.

Figura 48

Valores comerciales de interruptores magnéticos

Calibre / Cant. de polos	1P	2P	3P	4P
6A	EZ9F34106	EZ9F34206	EZ9F34306	EZ9F34406
10A	EZ9F34110	EZ9F34210	EZ9F34310	EZ9F34410
16A	EZ9F34116	EZ9F34216	EZ9F34316	EZ9F34416
20A	EZ9F34120	EZ9F34220	EZ9F34320	EZ9F34420
25A	EZ9F34125	EZ9F34225	EZ9F34325	EZ9F34425
32A	EZ9F34132	EZ9F34232	EZ9F34332	EZ9F34432
40A	EZ9F34140	EZ9F34240	EZ9F34340	EZ9F34440
50A	EZ9F34150	EZ9F34250	EZ9F34350	EZ9F34450
63A	EZ9F34163	EZ9F34263	EZ9F34363	EZ9F34463
Ancho en pasos de 9 mm	2	4	6	8

Enclavamiento para candado: 26970

Nota: Tomado de *Valores Comerciales Interruptores Magnéticos*, por Schneider Electric, 2023, https://download.schneider_electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Catalogo_Digital_EasyLine_Marzo2023_v05.pdf&p_Doc_Ref=EasySeries_AR

Con esto en cuenta, se selecciona el valor superior más cercano a 8.125A que corresponde a 10A, y debido a que la bomba es monofásica, se elige el modelo correspondiente a 2 polos EZ9F34210.

Figura 49

Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34210 10A 2P



Nota: Tomado de *Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34210*, por Schneider Electric, 2023, <https://www.se.com/ar/es/product/download-pdf/EZ9F34106>

Para el circuito de control, se tiene la fuente de alimentación que será de 24V DC, el transformador que será de 110V a 24V AC, las luces indicadoras, y todos elementos que serán alimentados desde la fuente cómo es el PLC y sensores. Usando como corriente máxima la que es capaz de entregar la fuente que es 3.2A y aplicando el factor de seguridad de 1.25 se tiene lo siguiente:

$$3.2A \times 1.25 = 4 A$$

Observando la Figura 50 se selecciona el valor superior más cercano a 4 A que corresponde a 6A, y debido a la protección del circuito de control es más importante en la línea que en el neutro por manejar corrientes pequeñas, se elige el modelo correspondiente a 1 polo EZ9F34106.

Figura 50

Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34106 6A 1P



Nota: Tomado de *Interruptor termomagnético Schneider modelo EZ9F34106*, por Schneider Electric, 2023, <https://www.se.com/ar/es/product/download-pdf/EZ9F34210>

Fusible y porta fusible. Un fusible es un dispositivo de seguridad eléctrica que protege el circuito de una sobre corriente. En el caso del PLC que funciona con 24V DC, el fusible se utiliza para prevenir daños al PLC en caso de una sobrecarga de corriente o un cortocircuito.

Si la corriente que fluye al PLC excede el valor nominal del fusible (debido a un error en el sistema, por ejemplo), el fusible se funde (o "quema") y corta la corriente eléctrica. Esto

protege al PLC, evitando que los componentes electrónicos se sobrecalienten o se quemen, lo que podría resultar en un fallo del sistema o incluso un incendio. Después de que se funde un fusible, se debe reemplazar con uno nuevo para restablecer la protección.

Para mayor protección del PLC que es uno de los elementos más importantes y además uno de los más costosos, se elige un fusible que cumpla con el consumo de la HMI que es de 10W, y además que soporte la carga en caso de que todas las salidas del PLC estén conectadas a su corriente máxima, cada salida puede consumir máximo 200 mA, con esto se tiene:

$$200mA * 14 = 2.8 A$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10 W}{24 V} = 0.42 A \text{ (Corriente de consumo del HMI)}$$

$$2.8 + 0.42 = 3.22 A$$

Y usando un factor de seguridad de 1.20:

$$3.22 A * 1.20 = 3.864 A$$

El valor nominal comercial más cercano corresponde a 4A, además, para colocarlo de manera adecuada en el tablero se selecciona un portafusible de la marca Ebasee que sea adecuado para el tamaño y corriente nominal del fusible cómo se observa en la Figura 52.

Figura 51

Fusible 4A CGC



Figura 52*Portafusible 32A Ebasee*

Nota: Tomado de *Portafusible 32A Ebasee*, por Shanghai Ebasee Electric Co., 2022,

<https://www.ebasee.com/product/rt18-low-voltage-fuse-holder/>

Fuente de Alimentación. La alimentación general del tablero será de 110V AC, sin embargo, algunos elementos necesitarán voltajes adicionales, Se elige una fuente DC que será la encargada de alimentar al PLC, a los sensores y las válvulas de descarga y retorno. Teniendo en cuenta que todos estos elementos trabajarán con 24V DC, se procede a buscar un modelo en el mercado que se ajuste a estos requerimientos.

Se encuentra el modelo EDR-75-24 de Mean Well, está es una fuente de alimentación conmutada para montaje en riel DIN de 75W (3.2A), es diseñada con una carcasa de metal que permite una excelente disipación de energía, además está incorporada con una protección contra cortocircuitos y sobrecarga, cumpliendo con las normativas internacionales de seguridad y EMC (compatibilidad electromagnética).

Figura 53

Fuente de alimentación de 24 VDC Mean Well



Nota: Tomado de *Fuente de alimentación de 24 VDC Mean Well*, por Mean Well, 2023, <https://www.meanwell-web.com/en-gb/ac-dc-industrial-din-rail-power-supply-output-24v-edr--75--24>

Transformador. Este permita reducir la alimentación nominal que son 110 VAC a los 24V AC, esto es necesario debido a que la válvula de control trabaja con este valor de voltaje.

El modelo elegido se muestra en la Figura 54, este se puede alimentar con 110 o 220V AC, y puede entregar 12 o 24V AC.

Figura 54

Transformador 110V – 24V AC



Contactador. Este es un dispositivo eléctrico que se utiliza en la industria y en aplicaciones para controlar remotamente el flujo de corriente hacia motores y otros equipos de

alto consumo. Funciona de manera similar a un interruptor, pero se activa eléctricamente, normalmente utilizando una bobina electromagnética. Los contactores son capaces de conmutar altas corrientes de manera segura y están diseñados para soportar el desgaste de numerosos ciclos de conmutación, lo que los hace ideales para controlar motores eléctricos y otros dispositivos de carga pesada.

Este irá conectado a la bomba, y la bobina del contactor será activada por una señal enviada desde el PLC. Para elegir el contactor, primero se debe seleccionar su categoría es la AC-3 que es una más comunes, que son usados para iniciar y detener en motor cuando está en pleno funcionamiento. A continuación, se debe elegir su corriente nominal, está igualmente debe ser mayor a la corriente nominal de la bomba que es de 6.5A, y con un factor de seguridad igualmente de 1.25; antes se había calculado que este valor es de 8.125A. En el mercado el valor superior más próximo es de 9A.

Se elige el Modelo LC1-D0910 de la marca CGC, este es un contactor trifásico capaz de trabajar con motores de hasta 3HP, su bobina es de 110/120V AC y posee un contacto auxiliar normalmente abierto.

Figura 55

Contactor Bobina 110/120V AC CGC



Relé térmico. Este es un dispositivo de protección que se utiliza para evitar el sobrecalentamiento y la sobrecarga en los motores eléctricos y otros equipos. Funciona detectando el calor generado por el exceso de corriente y desconectando el circuito cuando la temperatura sobrepasa un umbral predefinido. Este componente es crucial para garantizar la seguridad y la eficiencia en sistemas eléctricos y mecánicos, protegiendo así los equipos contra daños y minimizando el tiempo de inactividad.

Al igual que el contactor, se lo dimensiona teniendo en cuenta la corriente nominal de la bomba y el factor de seguridad. Estos dispositivos vienen en rango de corrientes, teniendo en cuenta que nuestra corriente de trabajo es de 8.125A, se escoge el rango más cercano a este, y que contenga al valor de corriente nominal de la bomba.

Se elige el relé térmico EBS1TR-25 de Ebasee, cuyo rango de corriente es de 5.5 a 8A, que cumple con las especificaciones antes mencionadas.

Figura 56

Relé térmico 5.5 – 8A Ebasee



Nota: Tomado de *Relé térmico 5.5 – 8A Ebasee*, por Shanghai Ebasee Electric Co., 2022, <https://www.ebasee.com/product/ebs1tr-thermal-relay/>

Relé encapsulado. Este un dispositivo electromecánico que se utiliza para controlar un circuito de salida de mayor potencia a través de uno de menor potencia. El encapsulado proporciona protección contra el entorno y mejora la durabilidad del relé. Se deberá usar un relé cuya bobina sea de 24VDC debido a que este el voltaje que entregan las salidas del PLC.

Su uso será importante ya que permitirá un aislamiento eléctrico entre el PLC que tiene salidas a transistor y las cargas a controlar, lo que lo protegerá de daños causados por transitorios de alta tensión o corrientes de cortocircuito.

Se usarán dos modelos de relés encapsulados, el primero es el modelo MK2P-I de la marca CGC, posee 8 pines, su bobina es de 24VDC, y permite activar cargas que trabajen en tanto en AC como DC, además posee contactos normalmente abierto y cerrados. Para poder colocar estos sensores en un riel DIN, es necesario colocarlos en una base. Este modelo será usado para activar la bobina del contactor. Por otro lado, tenemos el modelo MY2 de marca Camsco, que serán usados para activar las luces indicadoras y las válvulas de retorno y descarga.

Figura 57

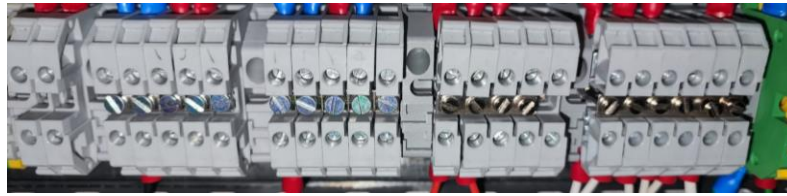
Relés encapsulados 8 pines – bobina 24V DC - CGC



Borneras. Estas piezas permiten unir de manera segura y eficiente los cables que transmiten la corriente eléctrica dentro del tablero. Se utilizan para simplificar las conexiones, ya que cada cable se inserta en un terminal específico, facilitando su identificación y mantenimiento. Su utilización también contribuye a la seguridad, minimizando el riesgo de contactos eléctricos accidentales. Además, son esenciales para organizar los cables y mantener la limpieza y orden dentro del tablero eléctrico. Con la borneras se usarán puentes equipotenciales, que permitirán puntear borneras, para ahorrar cable, y obtener un acabado más ordenado.

Figura 58

Borneras



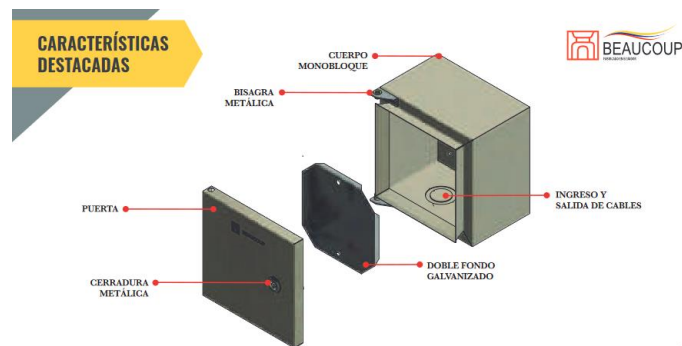
Dispositivos de mando y luces piloto. Los elementos de mando permitirán el control básico del equipo desde el panel frontal del tablero. Se seleccionará un botón para el paro de emergencia, un selector de 2 posiciones para modo manual y automático, un pulsador de marcha NA y un pulsador de paro NC.

Para las luces piloto, se trabajará con luces que se activen con voltajes AC, están irán de acuerdo con los elementos de mando señalados, una luz roja para emergencia y otra roja para paro, y de color verde las luces del modo automático, manual y marcha.

Tablero eléctrico. De acuerdo con todos los dispositivos vistos hasta ahora, se selecciona un tablero que tenga el tamaño apropiado para albergar todos estos elementos.

Se selecciona un tablero de 600 x 400 x 200mm, que se encuentra en el mercado ecuatoriano fabricado por Beucop cuyo modelo es el I-0306, que posee una protección IP42 y un peso aproximado de 8 kg. Además, para el montaje apropiado de los elementos se colocarán rieles DIN y canaletas. Se escogió riel DIN de 35x7.5mm y espesor de 1mm, y canaletas ranuradas de 40 x 20mm.

Las conexiones dentro del tablero eléctrico se indicarán en los planos eléctricos que se encuentren en los Anexos 01, 02 y 03.

Figura 59*Características de tablero eléctrico*

Nota: Tomado de *Catálogo de productos*, por Beaucoup, 2023, https://www.inselec.com.ec/wp-content/uploads/2023/03/CATALOGO-BEAUCOUP-2023_.pdf

Cableado.

Para el circuito de potencia se usará cable flexible 14 AWG y para el circuito de control se usará cable flexible 18 AWG, respetando el código de colores, como se observa en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10

Código colores: cableado potencia

Color	Función
Negro	Fase
Blanco	Neutro
Verde	Tierra

Tabla 11

Código colores: cableado control

Color	Función
Rojo	Positivo DC
Blanco	Común o Negativo DC
Azul	Entradas PLC
Amarillo	Salidas PLC

Diseño del subsistema de control

Lógica de control

El módulo didáctico dispondrá de un pulsador de marcha o inicialización del proceso, un pulsador de paro, un selector para modo manual - automático y un botón de paro de emergencia. Además, luces indicadoras que ayuden a visualizar el modo de trabajo del proceso. En caso de que en el tanque de reserva este vacío o no este dentro del nivel mínimo de agua, el proceso se detiene y se activará la luz indicadora de emergencia.

Los dos modos de operación son los siguientes:

MANUAL: Con este modo se da la posibilidad al usuario de seleccionar los actuadores que se desea activar: la bomba, la válvula de descarga o la válvula de retorno. Además de seleccionar cuál es la apertura de la válvula de control que desea. La activación manual de esto se lo hará a través de una pantalla HMI.

AUTOMÁTICO: En este modo se seleccionarán los sets points tanto para el caudal como para el nivel. El proceso inicia con la activación de la bomba para llenar el tanque de control hasta el nivel de set point ingresado (nivel medio o alto), luego de 5 segundos comenzará la etapa de vaciado, cuando el tanque de control se encuentra por debajo del nivel bajo, el proceso iniciará de nuevo.

El sistema tendrá la opción de poder accionarse desde el tablero de control como desde la HMI, y además de la selección de modos de funcionamiento, se implementará el paro en estado determinado y el paro de emergencia. Para poder realizar de manera adecuada la lógica de la programación, se procede a realizar la Guía Gemma, y el diagrama Grafcet, cómo se observa en los Anexos 04 y 05.

Tabla de variables

De acuerdo con lo planteado y los elementos ya seleccionados, se procede a realizar la tabla de asignación de variables de entradas y salidas que irán conectadas al PLC:

Tabla 12

Tabla de asignación de registro de variables principales para el PLC

N°.	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo Dato
Entradas Digitales				
1	Sensor de caudal 1	SF_1	I0.1	BOOL
2	Sensor de nivel bajo de tanque de reserva	SNB_TR	I0.2	BOOL
3	Sensor de caudal 2	SF_2	I0.3	BOOL
4	Sensor de nivel bajo de tanque de control	SNB_TC	I0.5	BOOL
5	Sensor de nivel medio de tanque de control	SNM_TC	I0.6	BOOL
6	Sensor de nivel alto de tanque de control	SNA_TC	I0.7	BOOL
7	Botón de paro de emergencia	EMERGENCIA	I1.0	BOOL
8	Selector modo manual-automático	S_MODOS	I1.1	BOOL
9	Pulsador NA para dar marcha al proceso	MARCHA	I1.2	BOOL
10	Pulsador NC para dar paro al proceso en una etapa determinada	PARO	I1.3	BOOL
Salidas Digitales				
11	Activación bomba para llenado de tanque	BOMBA	Q0.0	BOOL
12	Válvula de retorno a tanque de reserva	V_RETORNO	Q0.1	BOOL
13	Válvula para descarga de tanque de control	V_DESCARGA	Q0.2	BOOL
14	Luz indicadora de paro roja para paro	L_PARO	Q0.3	BOOL

15	Luz indicadora verde de puesta en marcha	L_MARCHA	Q0.4	BOOL
16	Luz indicadora verde de modo manual	L_AUTO	Q0.5	BOOL
17	Luz indicadora verde de modo automático	L_MANUAL	Q0.6	BOOL
18	Luz indicadora roja de paro de emergencia	L_EMERGENCIA	Q0.7	BOOL
Entradas Analógicas				
20	Señal de retroalimentación de la válvula de control	POS_V_CONTROL	AIW2	WORD
Salidas Analógicas				
21	Señal de control para la válvula de control	V_CONTROL	AQW0	WORD

Diseño de Controladores

Control On – Off Nivel

Se elige utilizar un controlador on-off para la variable de nivel debido a la naturaleza tanto de los sensores (sensores tipo flotador) y actuador (bomba). En control permite que la bomba funcione hasta que el nivel del agua en el tanque de control llegué al nivel deseado (set point), estos pueden ser: nivel medio o nivel alto, y a continuación se apague. Además, este controlador presenta las siguientes ventajas:

- **Compatibilidad con Señales Binarias:** Los sensores de flotador proporcionan una señal (0 o 1) que coincide perfectamente con la naturaleza binaria del controlador on-off. Esto elimina la necesidad de procesamiento adicional de la señal y simplifica el sistema.
- **Conservación del Actuador:** Una bomba sometida a ciclos constantes de encendido y apagado puede sufrir desgaste prematuro. El controlador on-off, al

trabajar con señales binarias, asegura que la bomba solo se activa cuando es necesario, reduciendo la frecuencia de los ciclos de encendido y apagado. Esto contribuye a la longevidad del actuador.

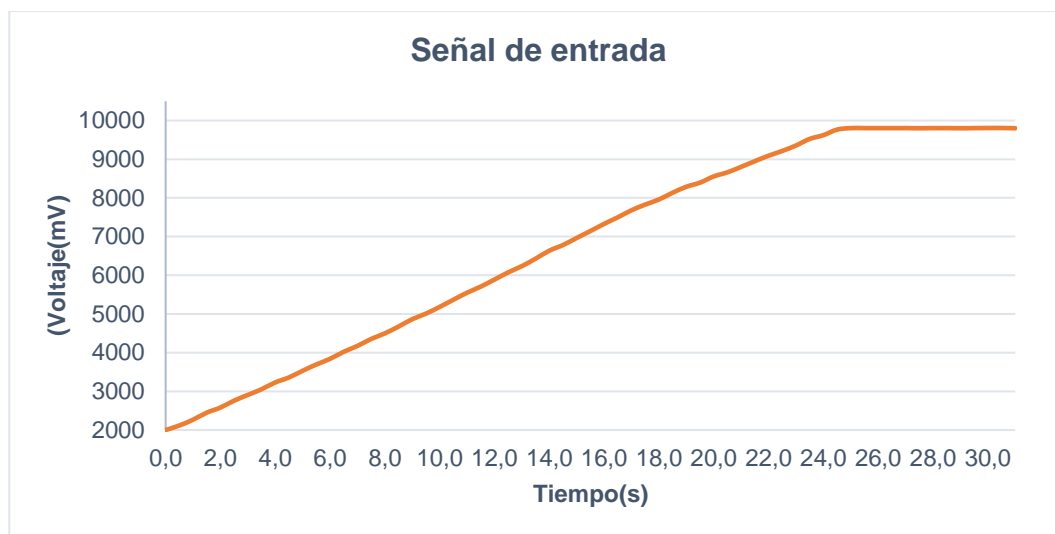
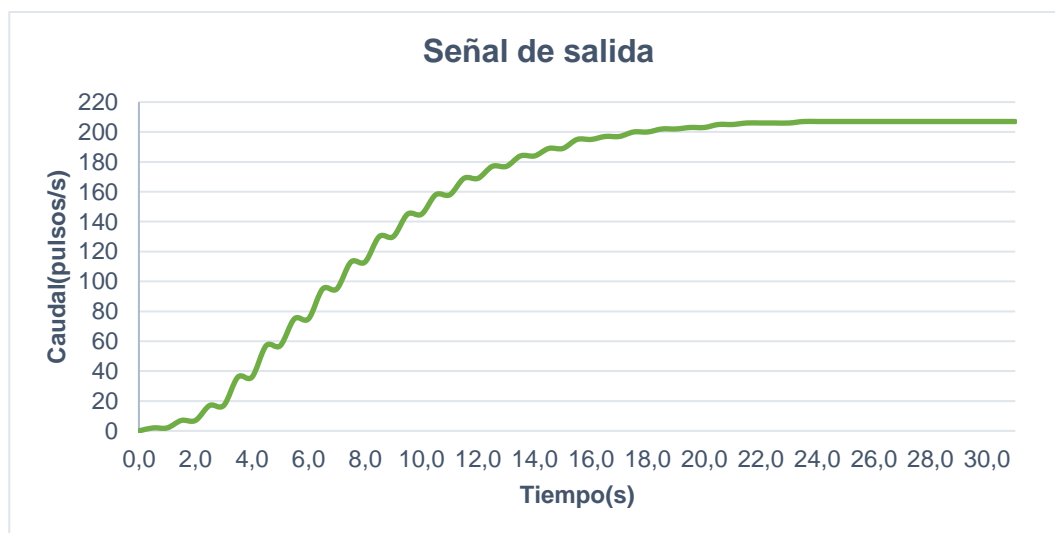
- **Respuesta Rápida y Precisa:** La simplicidad del controlador on-off permite una respuesta rápida y precisa a los cambios detectados por los sensores de flotador. Esto es vital para mantener el nivel de líquido dentro de los límites deseados sin oscilaciones innecesarias.

Control PID Caudal

Para la variable de caudal, se procede a realizar el diseño del controlador PID, en este sistema el actuador será la válvula de control, que permitirá la apertura de forma proporcional conforme al caudal deseado. Este control permitirá que la válvula responda de manera más gradual y precisa a las señales de controlador, además mejora la estabilidad del sistema y reduce las oscilaciones.

Para empezar con el diseño del controlador PID, primero se debe identificar a la planta, por lo que se realiza una medición con una señal de entrada tipo escalón, donde la entrada será el voltaje que entrega la válvula de acuerdo con la posición que se encuentra, que será 2V (completamente cerrada) y 9.9V (completamente abierta), y la salida será el caudal en pulsos x segundo que está leyendo el sensor de caudal que se encuentra a continuación de la válvula de control en la tubería de 1/2".

Se realiza la obtención de datos con un tiempo de muestro de 0.5s, y un total 63 valores tanto para el valor de voltaje como de caudal, cuando la válvula ha llegado a su máximo valor de apertura. Las gráficas de entrada vs salida se encuentran a continuación:

Figura 60*Señal de entrada***Figura 61***Señal de salida*

A continuación, con el comando `ident`, en Matlab, se procede a realizar la identificación de planta, se evalúan dos funciones de transferencia, la primera de un polo y la segunda de dos polos, para evaluar cuál dispone del mayor valor de aceptación.

Figura 62*Identificación de la planta: Modelo un polo*

```

Plant5 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      1+Tp1*s

      Kp = 1.087
      Tp1 = 8.6156

Parameterization:
{'P1'}
Number of free coefficients: 2
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data.
Fit to estimation data: 83.9%
FPE: 0.003264, MSE: 0.002967

```

Figura 63*Identificación de la planta: Modelo dos polos*

```

Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)

      Kp = 1.0011
      Tp1 = 4.0612
      Tp2 = 4.1212

Parameterization:
{'P2'}
Number of free coefficients: 3
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data.
Fit to estimation data: 91.08%
FPE: 0.001067, MSE: 0.0009099

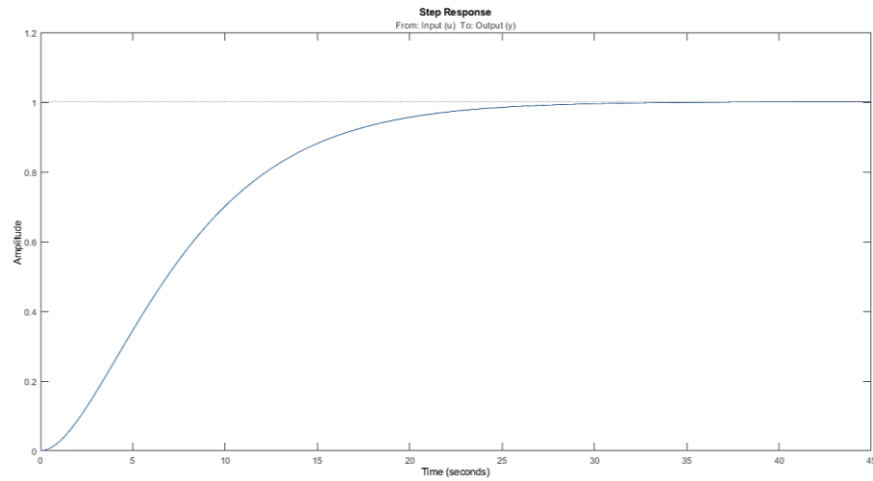
```

Cómo se puede observar en las Figuras 62 y 63, la función de transferencia más cercana al proceso es la de segundo orden con un 91.08%, por lo que se procede a trabajar sobre esta para poder realizar el diseño del controlador.

$$G(s) = \frac{1.011}{(1 + 4.0611s)(1 + 4.1212s)} = \frac{1.011}{16.74s^2 + 8.182s + 1}$$

Figura 64

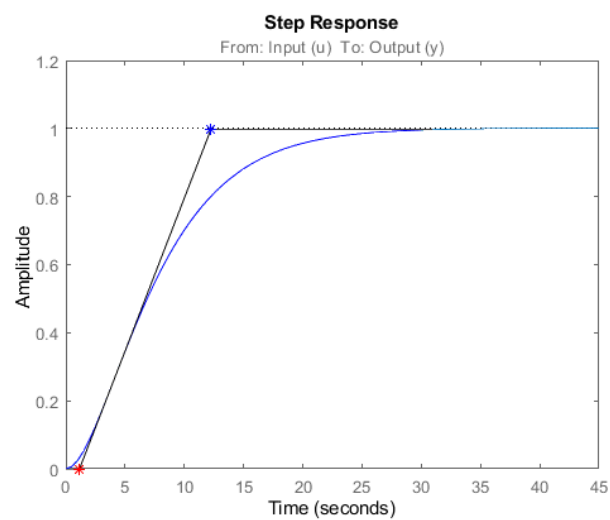
Respuesta de la planta en lazo abierto



Se procede a aplicar el método de Ziegler – Nichols, donde deberemos encontrar el tiempo de retardo L , y una constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante se encuentran dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de curva, como se observa continuación:

Figura 65

Gráfica para encontrar L y T



Con esto se obtiene que el valor de T corresponde a 11.09 y L a 1.15, luego con las fórmulas establecidas en la Tabla 13, se encuentra los valores de Kp, Ti y Td.

Tabla 13

Constantes PID

	Fórmulas			Valores		
	Kp	Ki	Td	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0	9.65		
PI	0.9T/L	L/0.3	0	8.68	3.83	
PID	1.2 x T/L	2*L	0.5*L	11.58	2.3	0.57

Con lo que se tiene los valores de una sintonización previa del Kp, Ti y Td:

$$Kp = 11.58$$

$$Ti = 3.83$$

$$Td = 0.57$$

Con estos valores se ejecuta pruebas, con los que se obtendrá los valores finales de las constantes para el controlador PID.

Programación del PLC

Con el diagrama Grafcet (Anexo 05) y la Guía Gemma (Anexo 04), se procede a realizar la programación en lenguaje Ladder en el PLC. La programación completa del PLC se encuentra en el (Anexo 06), sin embargo, la configuración básica del PLC y las condiciones más importantes de la programación se indican a continuación.

Configuraciones básicas. Al crear un nuevo proyecto, se debe seleccionar el modelo del equipo con el que se va a trabajar, configurar las direcciones de las entradas y salidas, en el caso de las entradas y salidas analógicas se debe especificar su rango de trabajo (4 – 20 mA o 0 a 10V), y de ser necesario también los puertos de comunicación.

Figura 66

Configuración básica del PLC

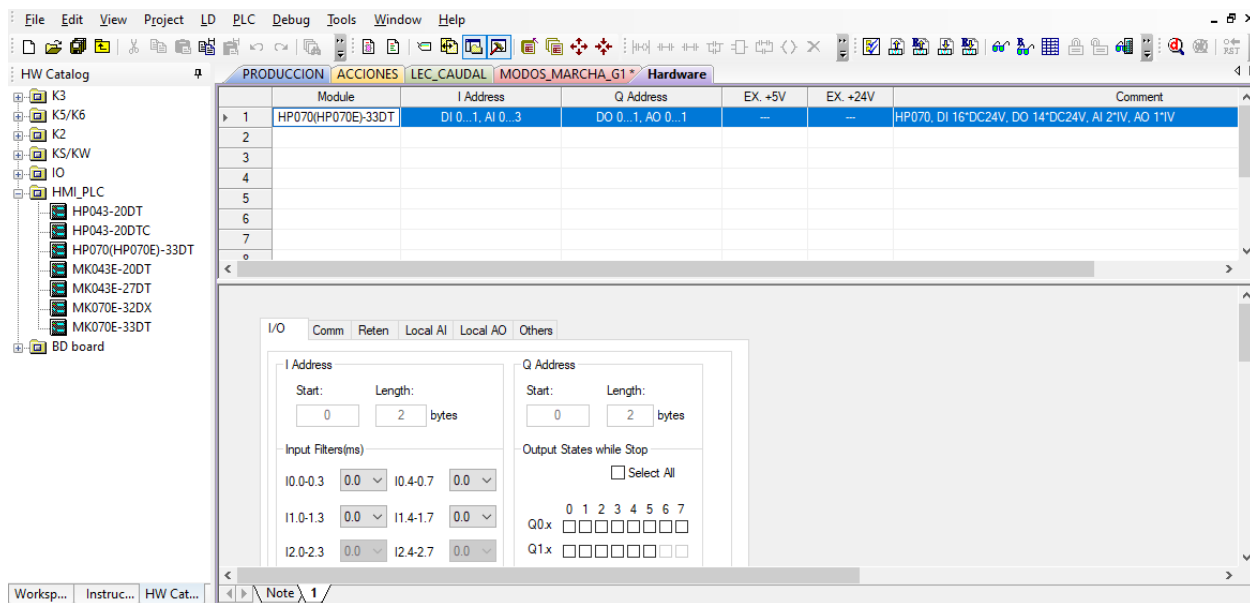


Figura 67

Configuración de las entradas analógicas

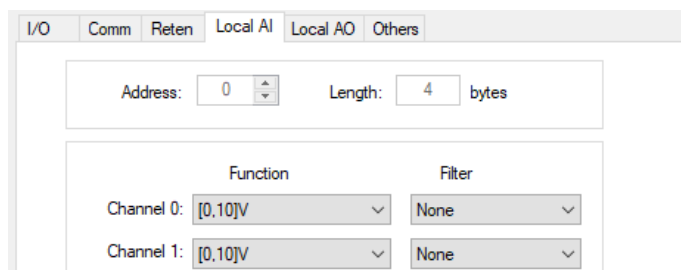
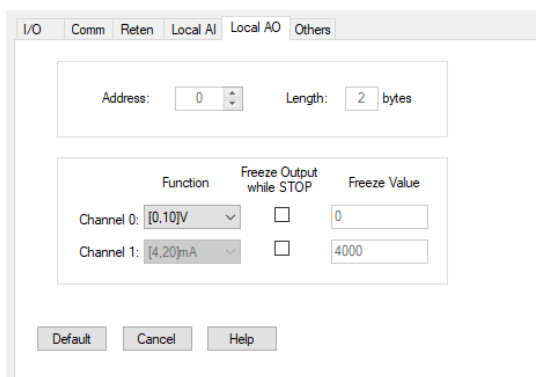


Figura 68

Configuración de las salidas analógicas



Contadores. Debido a que se va a trabajar con los sensores de flujo que envían una señal en tren de pulsos, se deberá habilitar y configurar el HSC (High Speed Counter) del PLC para poder leer la señal de los sensores. Primero, se deberá abrir la ventana de configuración llamada HSC Wizard, a continuación, en esta se configura y habilitar cada HSC (el modelo con él se trabaja posee solamente 2 contadores HSC0 y HSC1), para este trabajo solo es necesario configurar los aspectos más importantes que son el modo de trabajo y el sentido del conteo. Los HSC poseen algunos modos de operación como se indica en el Anexo 07, para esta programación se usará el modo 0, que permite contar pulsos de una sola fase y que ingresan por direcciones ya designadas, para el HSC0 es la entrada I0.1 y la el HSC1 es la entrada I0.3. Y se selecciona la dirección de conteo, que es en el sentido positivo.

Figura 69

Selección de la ventana HSC Wizard

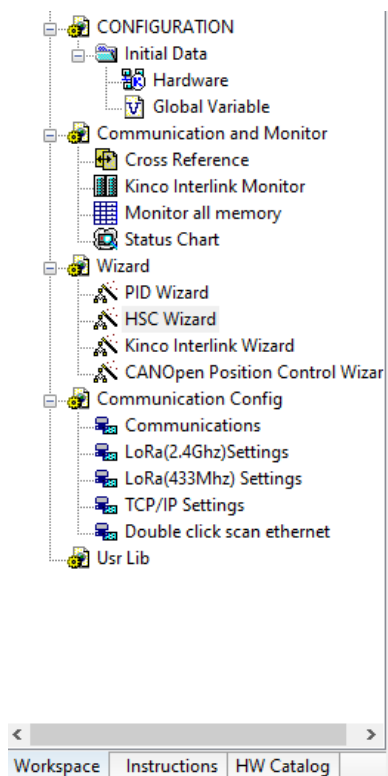


Figura 70*Ventana HSC Wizard*

HSC Wizard

HSC: HSC0 Mode: Mode 0 Enable HSC Start method: Using HSC instruction

Quadrature rate: 1x Reset signal level: High Start signal level: High

Signal Input: Pulse: IO.1;

Update direction New direction: Up
 Update count value New count value: 0

Enable external reset interrupt Interrupt routine:
 Enable external direction-changed interrupt Interrupt routine:

PV and corresponding interrupts

Enable multiple PVs Relationship between PVs: Relative Cyclic "CV=PV" interrupts

Multiple PV's settings

Update PV and quantity Quantity: 6 Starting location of PV table(VB): 3009

At each calling HSC instruction, its Multi-PV table: Runs from 1st segment

Index	Address	Value	Event No.	Interrupt routine

Up
Down
Delete

Single PV settings(compatible with K5)

Update preset value(PV) New PV: 2 Enable "CV=PV" interrupt Interrupt routine:

Apply OK Cancel Help

Figura 71*Configuración del contador HSC0*

HSC Wizard

HSC: HSC0 Mode: Mode 0 Enable HSC Start method: Using HSC instruction

Quadrature rate: 1x Reset signal level: High Start signal level: High

Signal Input: Pulse: IO.1;

Update direction New direction: Up
 Update count value New count value: 0

Enable external reset interrupt Interrupt routine:
 Enable external direction-changed interrupt Interrupt routine:

PV and corresponding interrupts

Enable multiple PVs Relationship between PVs: Relative Cyclic "CV=PV" interrupts

Multiple PV's settings

Update PV and quantity Quantity: 6 Starting location of PV table(VB): 3009

At each calling HSC instruction, its Multi-PV table: Runs from 1st segment

Index	Address	Value	Event No.	Interrupt routine

Up
Down
Delete

Single PV settings(compatible with K5)

Update preset value(PV) New PV: 2 Enable "CV=PV" interrupt Interrupt routine:

Apply OK Cancel Help

Figura 72

Configuración del contador HSC1

The screenshot shows the 'HSC Wizard' configuration window with the following settings:

- HSC: HSC1
- Mode: Mode 0
- Enable HSC
- Start method: Using HSC instruction
- Quadrature rate: 1x
- Reset signal level: High
- Start signal level: High
- Signal Input: Pulse: IO.3;
- Update direction, New direction: Up
- Update count value, New count value: 0
- Enable external reset interrupt, Interrupt routine: [dropdown]
- Enable external direction-changed interrupt, Interrupt routine: [dropdown]

Una vez realizada esta configuración, se procede a realizar la programación de estos contadores en el PLC, que permitirán usar los valores que envían estos contadores. Para este esto se usa el bloque HDEF, donde se ingresa el contador a usar (0 o 1) y el modo de uso (0), y el bloque HSC, que permite que contador se ejecute, y de igual forma se ingresa el contador que se usa. A continuación, se debe habilitar las memorias SM37.7 y SM47.7 que permiten que se habiliten los contadores en la programación. Una vez realizado esto, se puede obtener los valores del caudal, primero se puede obtener los pulsos totales, estos se guardan en las variables HC0 y HC1 del PLC respectivamente, sin embargo, para este trabajo se necesita trabajar con los pulsos por segundo, por lo que se procede a usar el bloque SPD, que permite obtener esta operación, en este bloque se ingresa que contador se está usando y el tiempo en ms, en este caso serían 1000 ms que es un 1 segundo.

Figura 73

Configuración de HSC0 y HSC1

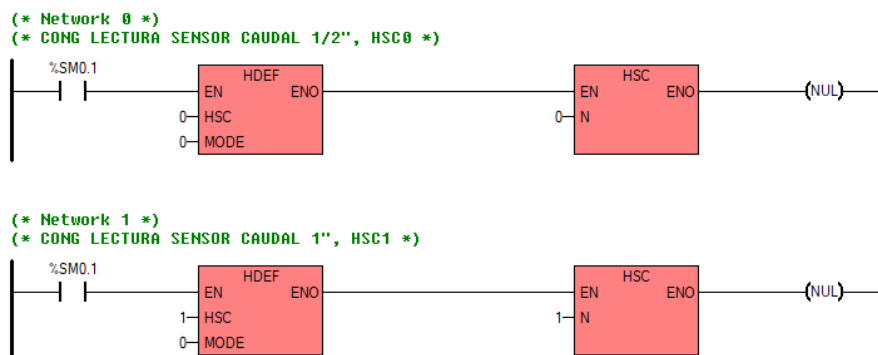


Figura 74

Activación de HSC0 y HSC1

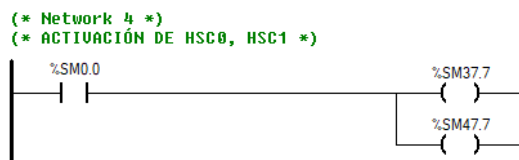


Figura 75

Lectura de pulsos totales de HSC0 y HSC1

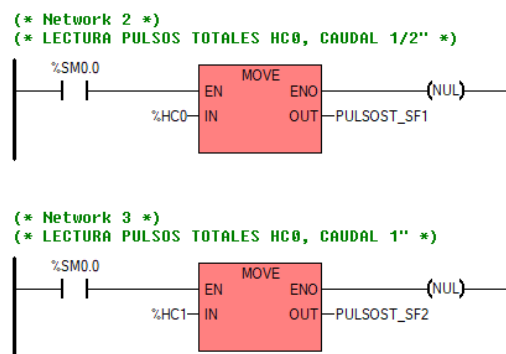
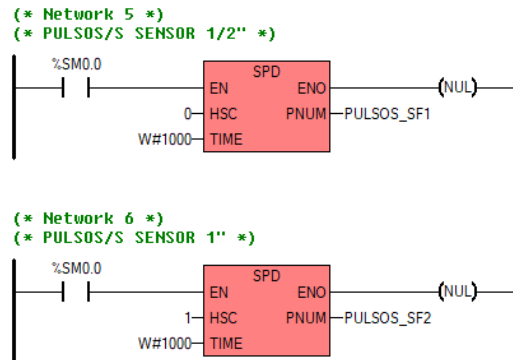


Figura 76

Lectura de pulsos por segundo de HSC0 y HSC1



PID. Para poder realizar la programación del bloque PID, se deben definir algunos valores, como son el set point, el valor de la variable de proceso, el rango de trabajo de la entrada, el rango de trabajo de salida, el valor de K_p , T_i , T_d , el tiempo de muestreo del bloque, la selección de modo de trabajo del bloque (manual o automático), y un valor de escala para el modo manual. Con las pruebas realizadas para obtener la función de transferencia, se sabe que los valores máximos y mínimos de entrada de 2000 y 9900, los de salidas de 0 a 210 pulsos/s y, además, los valores de K_p , T_i , T_d , fueron calculados anteriormente.

Se establece un valor por defecto del set point, que luego podrá ser modificado, a través del HMI, lo que el bloque entregará a salida será una señal de control para la válvula que irá desde los 2000 a 9900mV, que permitirá que la válvula que abra o cierre de manera proporcional y permitirá que el flujo se mantenga en el valor de consigna, la programación de este bloque se encuentra a continuación:

Figura 77

Valor por defecto del set point

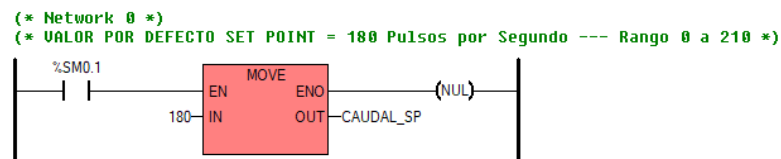


Figura 78

Tiempo de muestreo del bloque PID

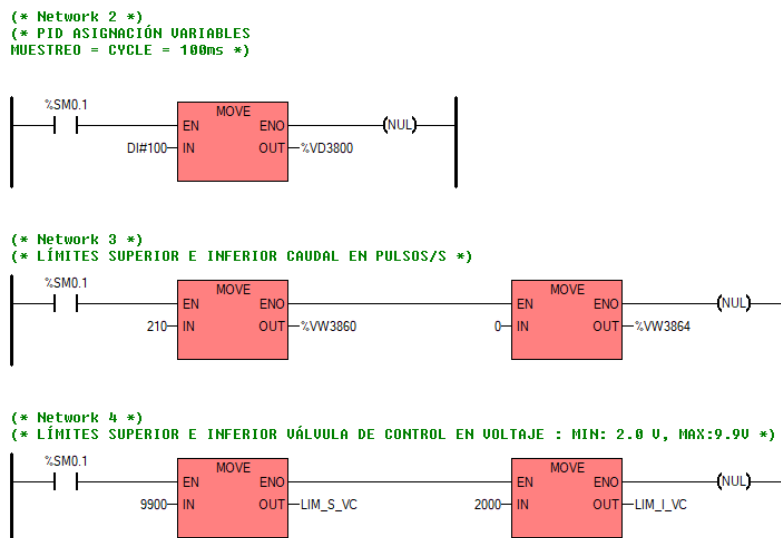


Figura 79

Asignación valor modo manual y valores Kp, Ti y Td

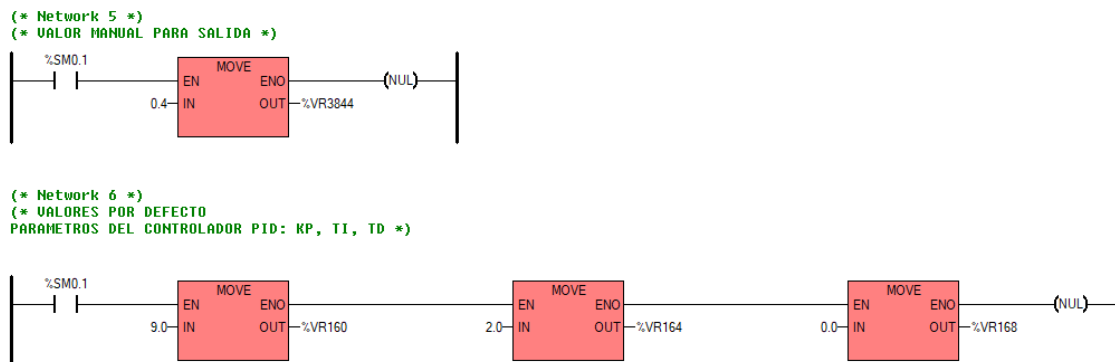
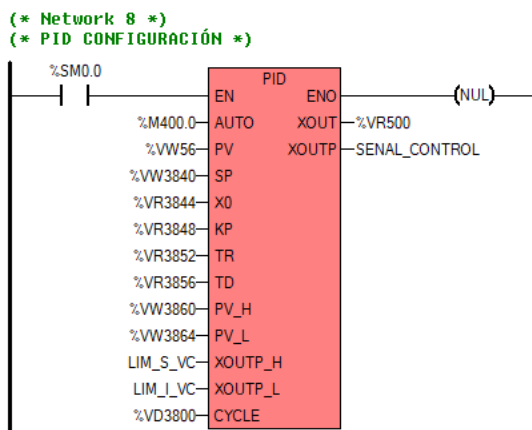


Figura 80

Bloque PID



Simulación. Dentro del programa se puede realizar la simulación de la programación sin necesidad de tener conectado el PLC. Para poder realizar esto, se debe realizar la compilación del proyecto, y a continuación se elige simulación, cómo se observa en las siguientes figuras.

Figura 81

Compilación del proyecto

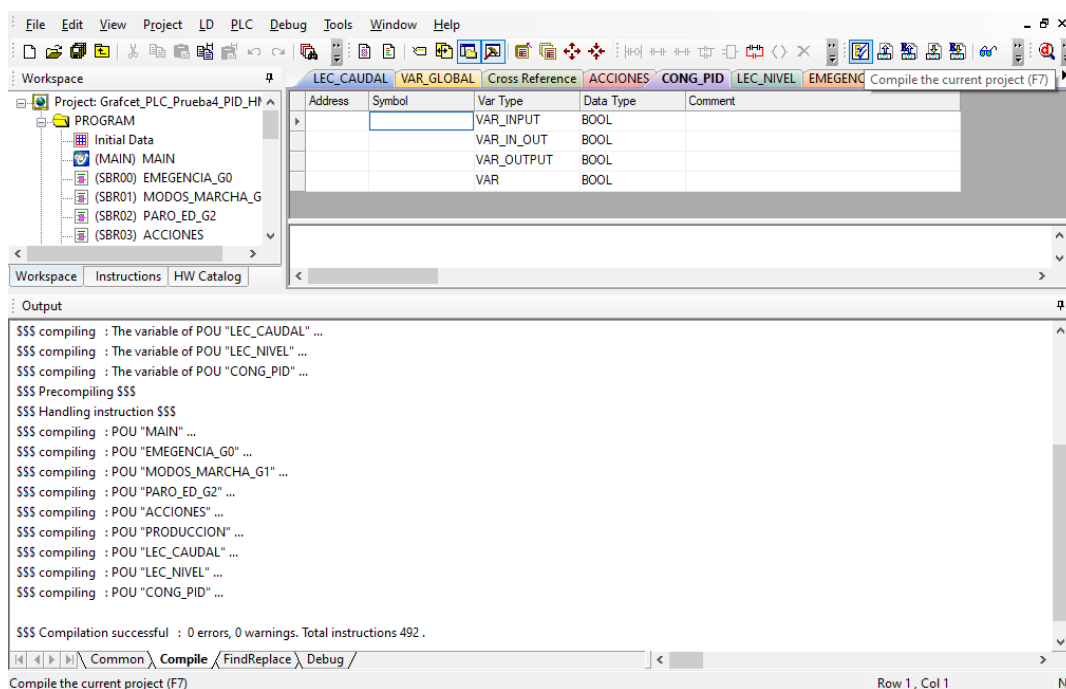


Figura 82

Selección del modo de simulación

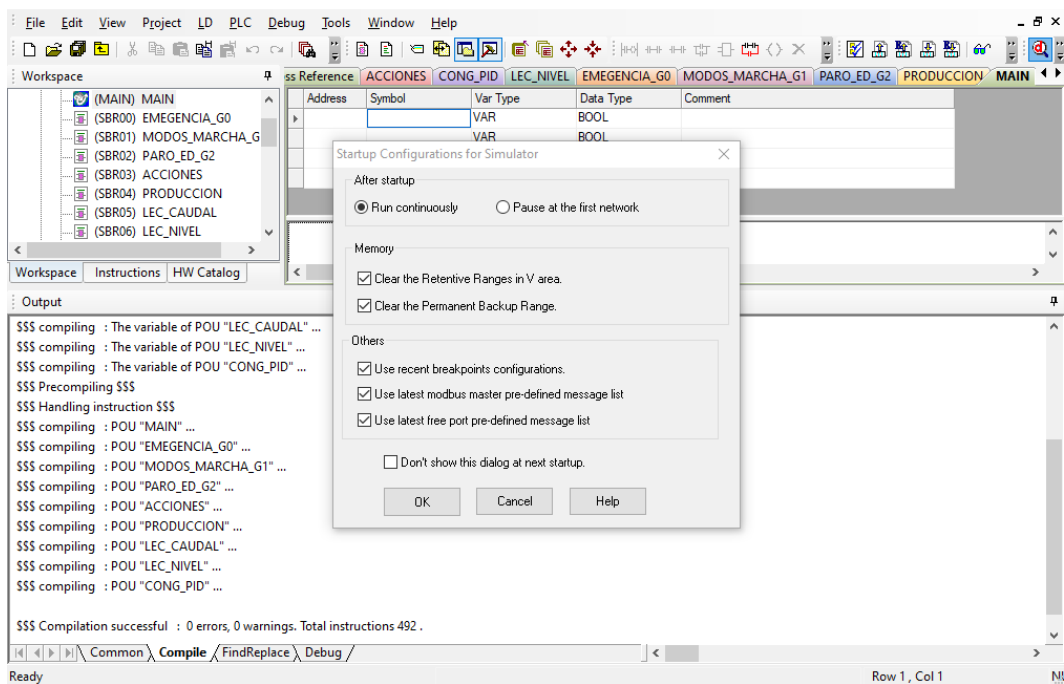
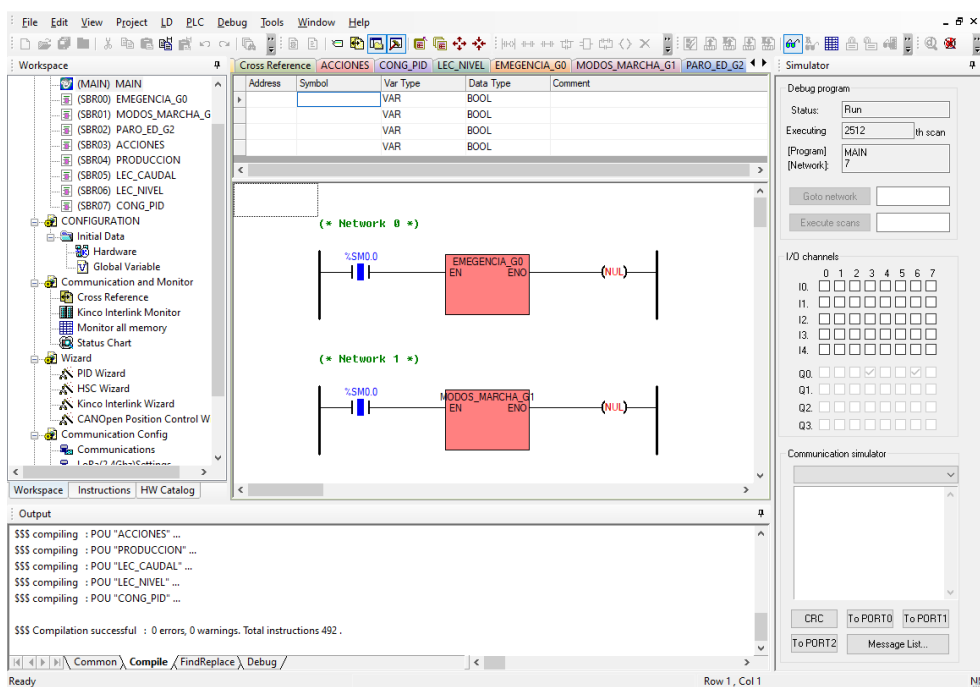


Figura 83

Simulación del programa



Carga. Una vez realizada la programación, se debe cargar el programa al PLC, para esto se conecta el equipo mediante el cable USB al computador, a continuación, se configura el puerto al cual está conectado, y finalmente se procede a cargar. También, si se requiere mientras el equipo está conectado y con el programa ya cargado, es posible monitorear el proceso en tiempo real.

Figura 84

Configuración del puerto de carga

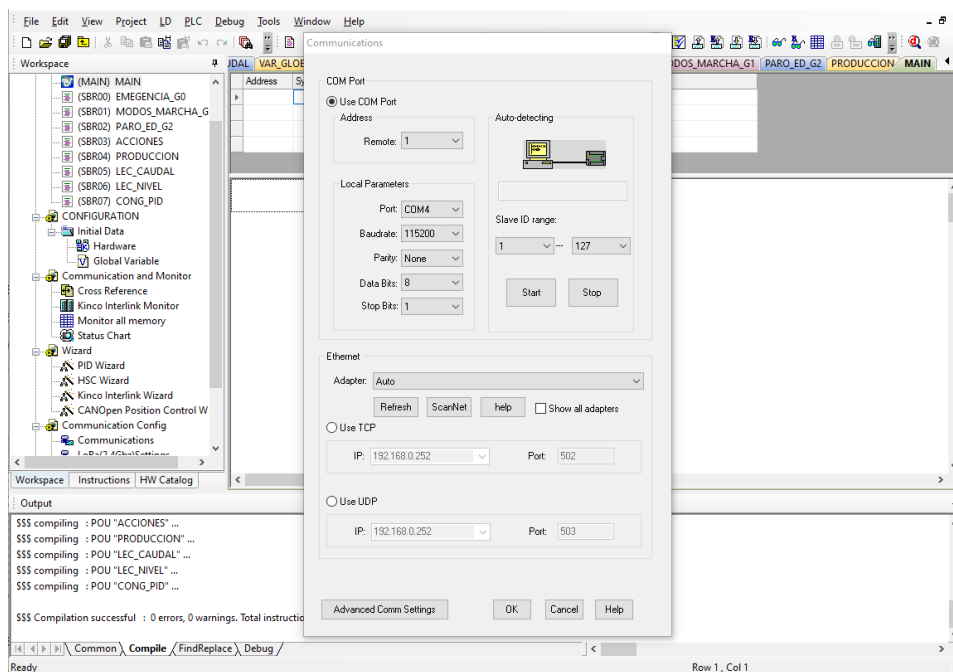


Figura 85

Carga del programa al PLC

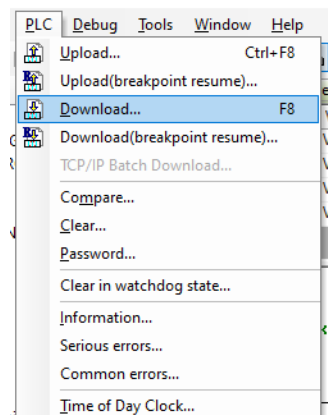
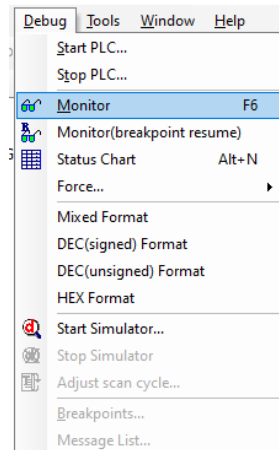


Figura 86

Monitoreo en tiempo real del PLC



Programación de la HMI

Para la programación de las pantallas HMI se utilizó el software Kinco HPBuilder, dicho software es libre. Se debe realizar las siguientes configuraciones que se detallan a continuación:

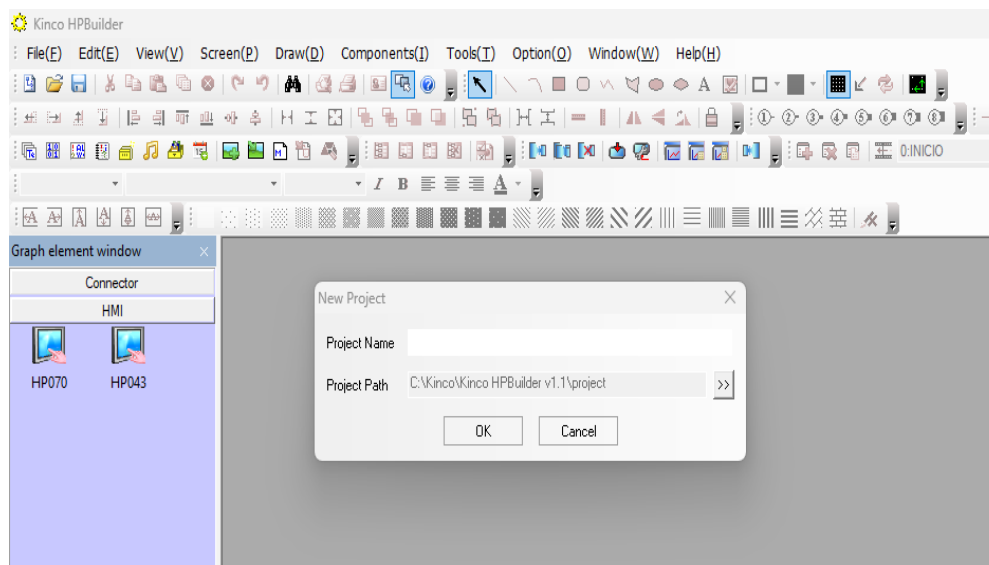
Creación de un nuevo proyecto:

Abrir el programa Kinco HPBuilder y seleccionar "Nuevo Proyecto" o "New Project".

Definir el nombre y la ubicación del proyecto en la computadora.

Figura 87

Creación de nuevo proyecto en software Kinco HPBuilder.

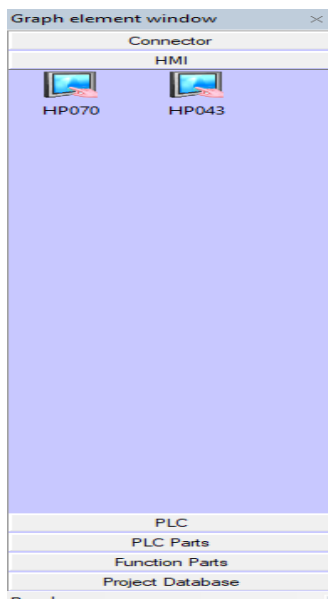


Selección del modelo de HMI:

Seleccionar el modelo específico del HMI de la lista de dispositivos compatibles, en este caso es Kinco HMI-PLC HP070-33DT.

Figura 88

Selección de modelo de HMI a usar software Kinco Builder.

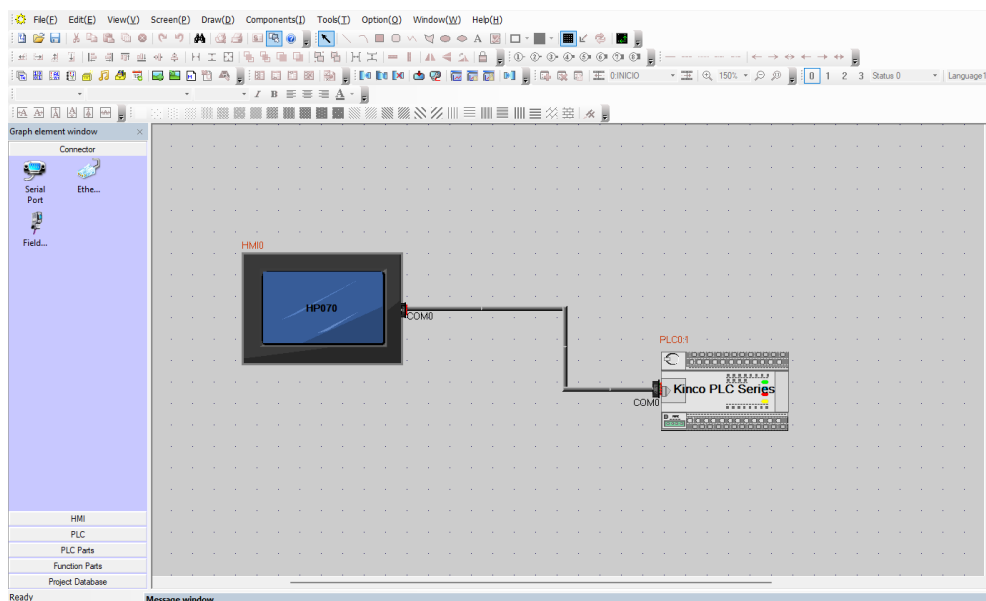


Configuración de la comunicación:

Se debe establecer la comunicación entre el HMI y el dispositivo que se va a controlar, dicho dispositivo es el PLC que está acoplado.

Figura 89

Comunicación HMI-PLC.

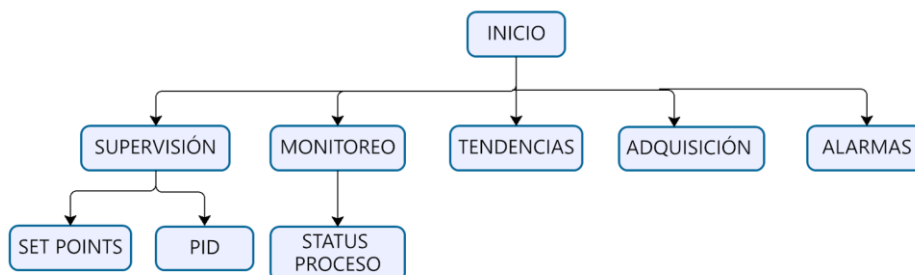


Diseño de pantallas:

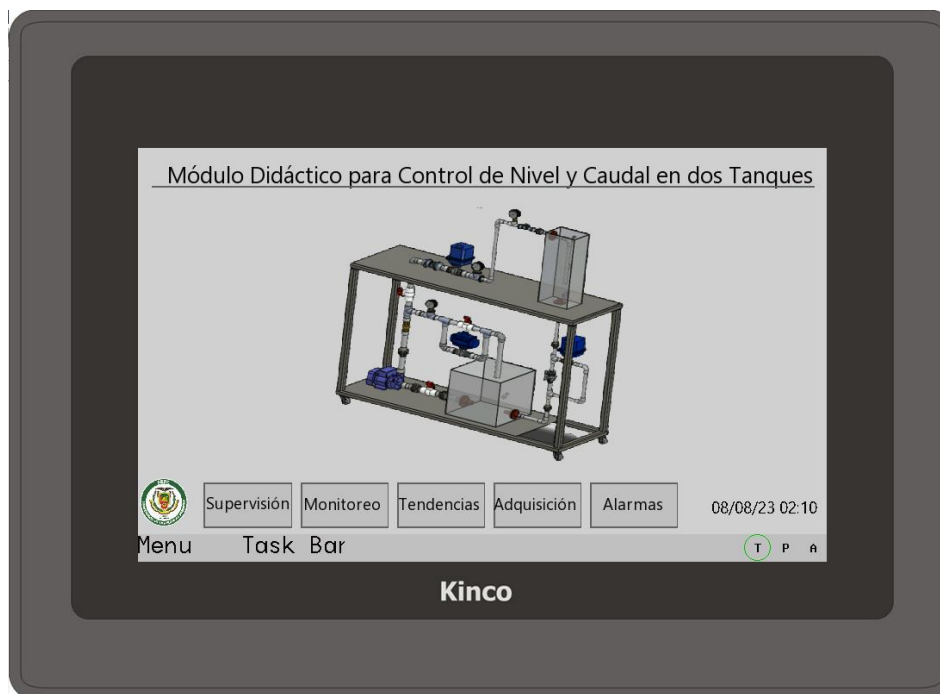
Para el diseño se siguió las recomendaciones propuestas de la metodología dada en la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS) y adicionalmente las de Alto Rendimiento para HMI utilizadas actualmente en la industria 4.0 propuestas por (Hollifield, 2021).

Inicialmente se establece la arquitectura y navegación de las HMI además la distribución de componentes, luego se procede a indicar los parámetros como los colores, texto, tablas, botones, tendencias, valores y comandos de ingreso.

Se indica la arquitectura de la HMI, en donde se define las pantallas que utilizará el usuario.

Figura 90*Arquitectura de HMI.*

Acogiendo las recomendaciones se diseña en primera instancia la pantalla de Inicio la cual estará compuesta principalmente de logotipo, menú de navegación, imagen y fecha y hora.

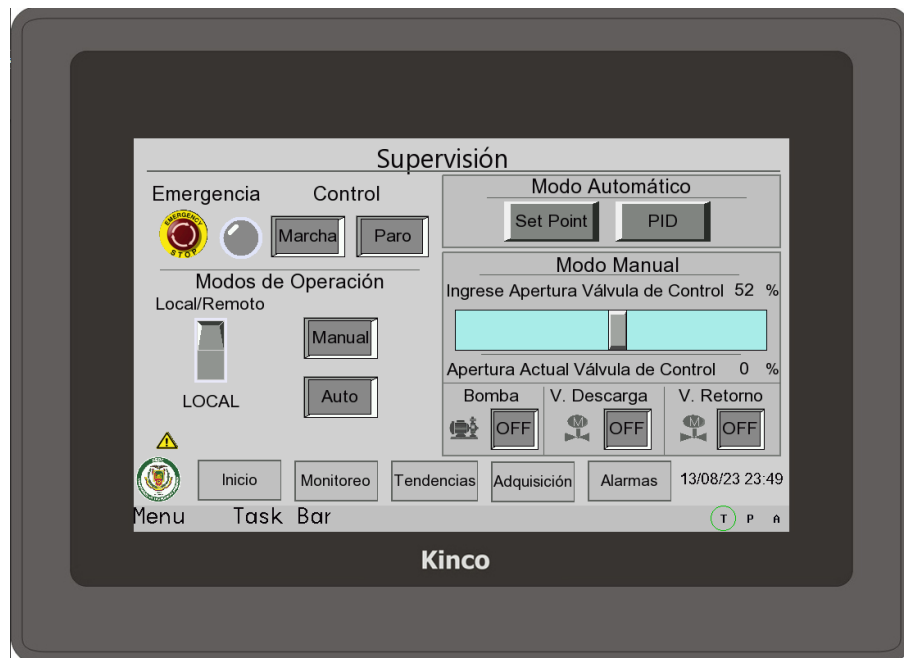
Figura 91*Diseño de pantalla de Inicio.*

La pantalla Supervisión está compuesta por los botones principales para controlar la planta por medio de los dos modos de operación respecto a las variables a controlar de nivel y caudal dando la opción de ingresar el porcentaje de apertura de la válvula de control, set point

correspondiente a nivel y caudal, constantes PID, para ello se hizo uso de botones, sliders, animaciones y botones de navegación.

Figura 92

Diseño de pantalla de Supervisión.



Para la pantalla de Monitoreo se utilizó animación del proceso, indicadores y botón para la ventana popup de estatus proceso para que el usuario pueda observar en que etapa está el proceso.

Figura 93

Diseño de pantalla de Monitoreo.

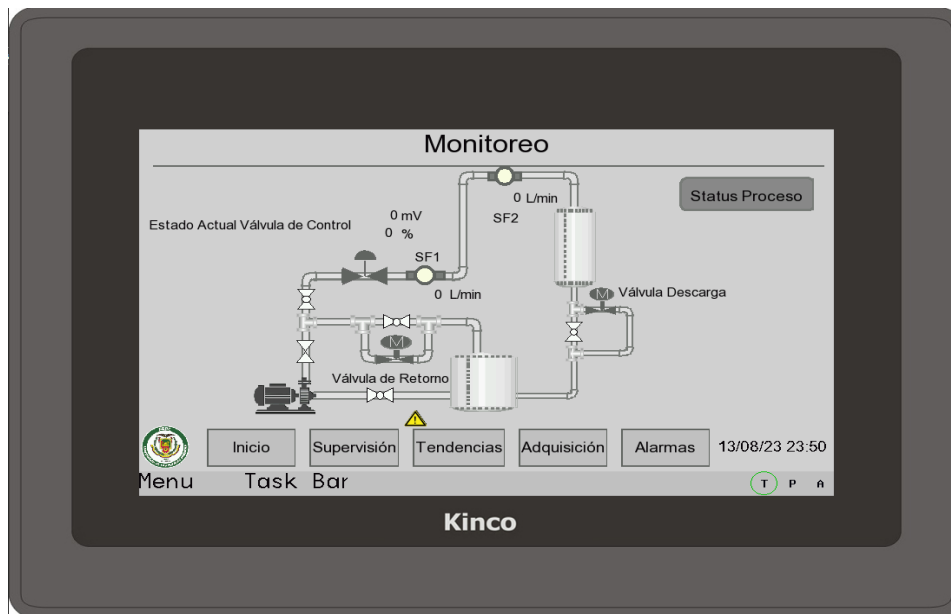
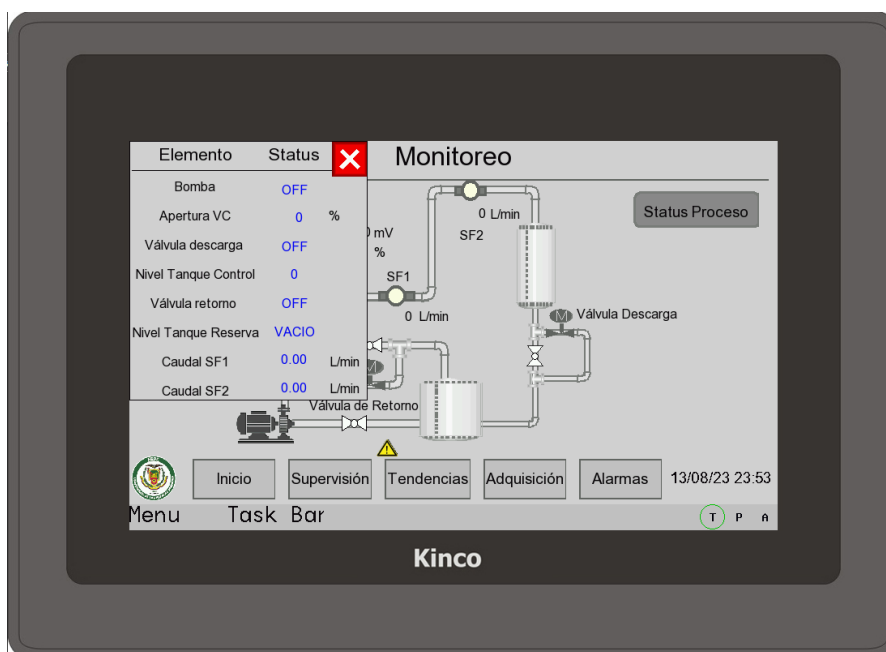


Figura 94

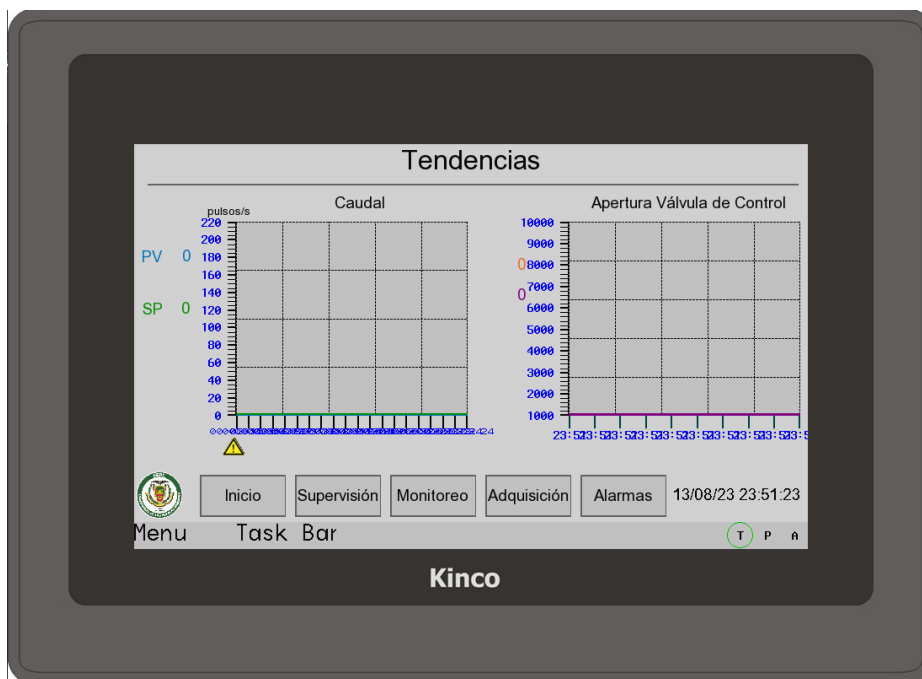
Diseño de popup ventana Status Proceso.



En la pantalla de Tendencias proporcionara las gráficas de Caudal respecto al set point y variable del proceso adicionalmente la apertura de la válvula respecto al voltaje.

Figura 95

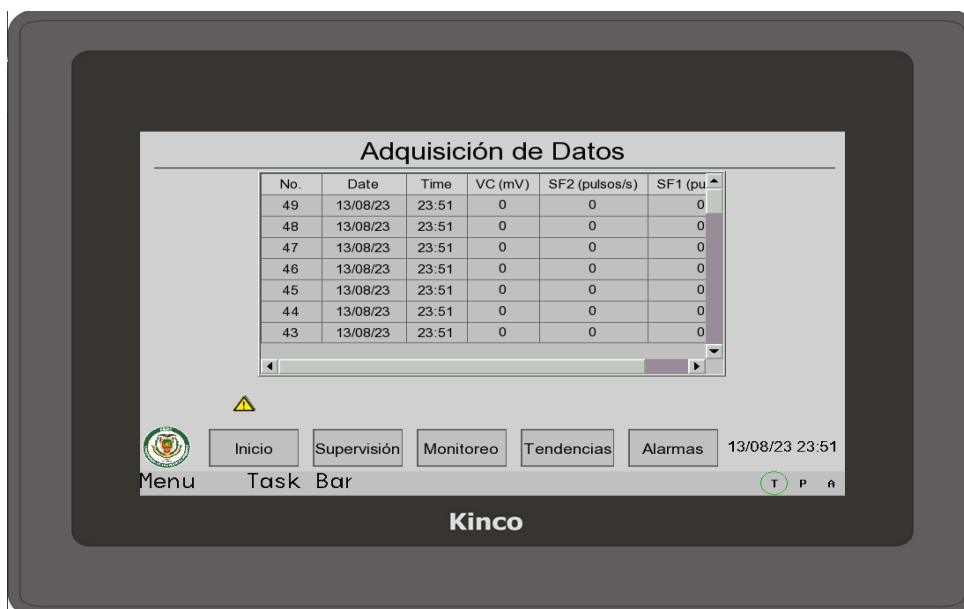
Diseño de pantalla de Tendencias.



La pantalla de Adquisición de Datos proporciona las lecturas dadas en el proceso que se requieren como es el caso de caudal SP, caudal PV y apertura de la válvula de control.

Figura 96

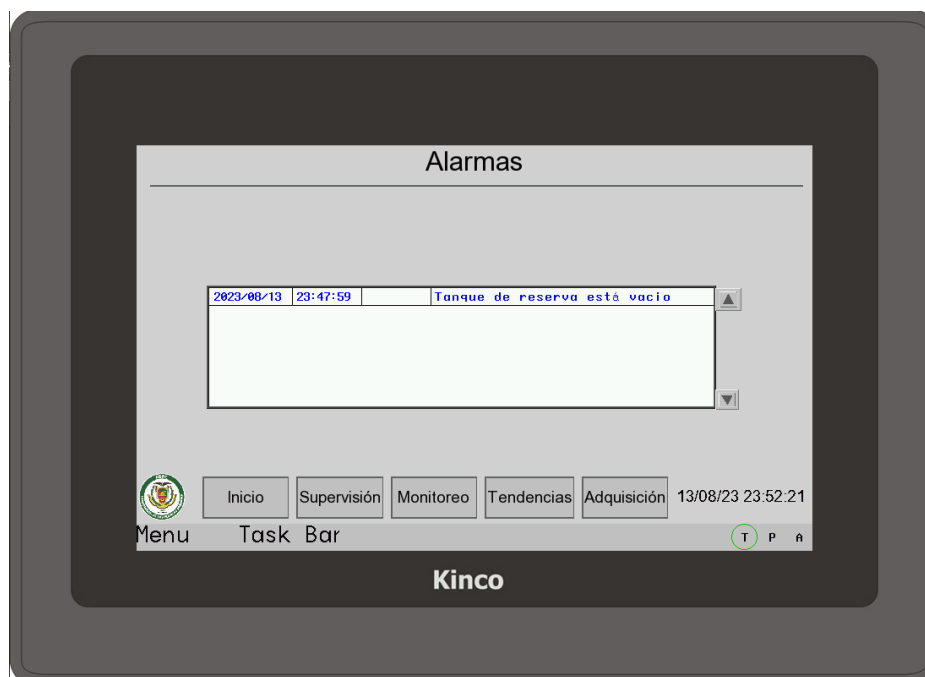
Diseño de pantalla de Adquisición de datos.



Finalmente es necesario una pantalla de Alarmas donde se muestran los mensajes de alerta cuando se de algún evento de peligro.

Figura 97

Diseño de pantalla de Alarmas.



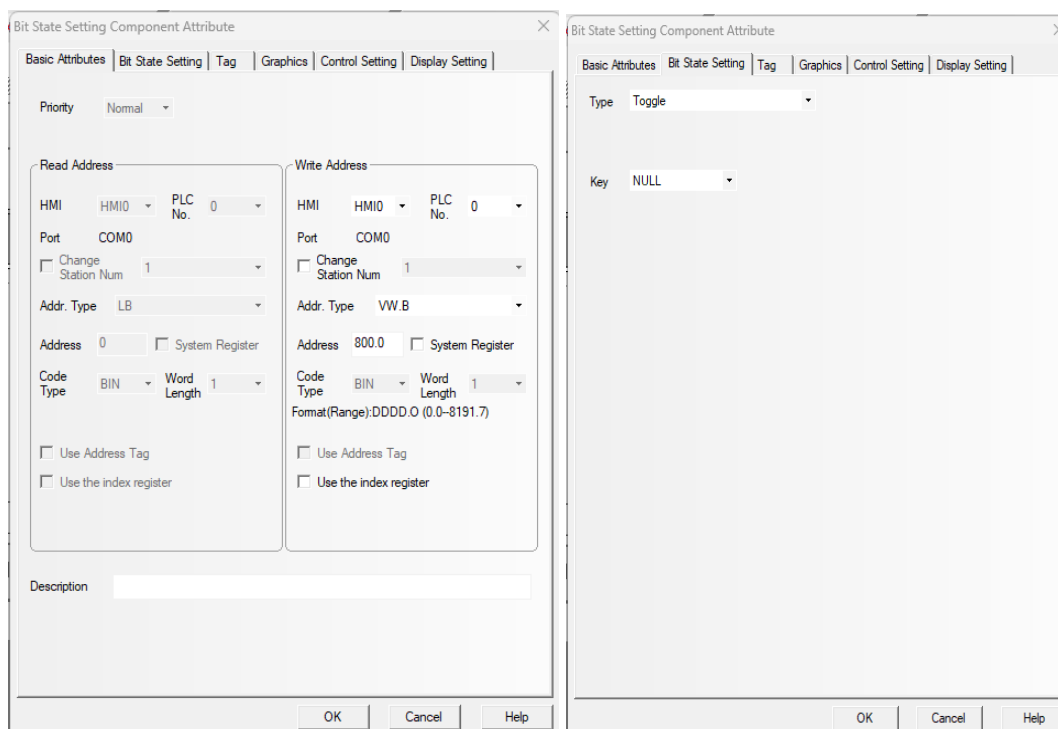
Programación de eventos y acciones:

Definir las acciones que se llevarán a cabo cuando el usuario interactúe con la HMI.

Para asignar funciones a los botones para que activen o desactiven dispositivos, cambien valores de variables, etc.

Figura 98

Configuración de dirección y tipo de botón de emergencia.

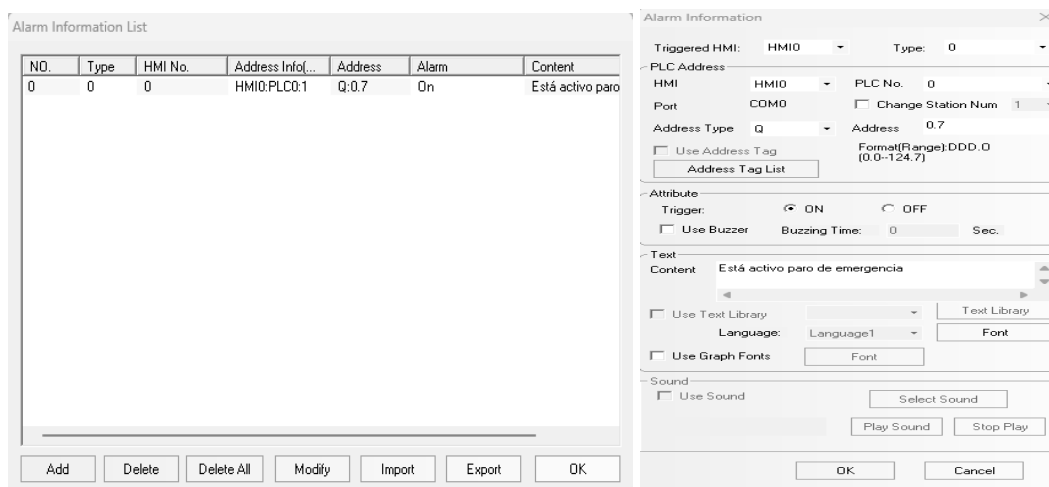


Configuración de alarmas:

Configurar las alarmas que deben activarse en caso de que ocurran situaciones de peligro en el sistema controlado.

Figura 99

Configuración de alarmas.

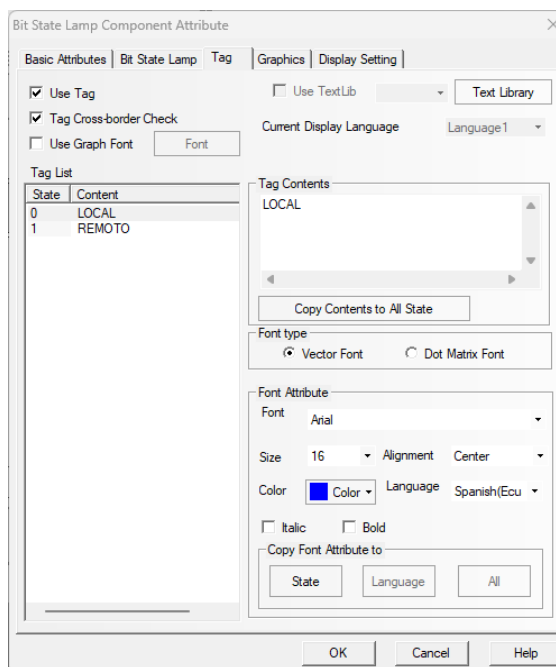


Asignación de etiquetas y variables:

Asignar etiquetas a los elementos de pantalla para facilitar la programación y mejorar la comprensión del proyecto. Configurar las variables que se utilizarán para almacenar y mostrar datos en la HMI.

Figura 100

Configuración de tag para variable modo Local / Remoto.



Simulación y pruebas:

Utilizar la función de simulación para verificar el funcionamiento de la HMI antes de implementarla en el sistema real.

Figura 101

Botón compilar en software.

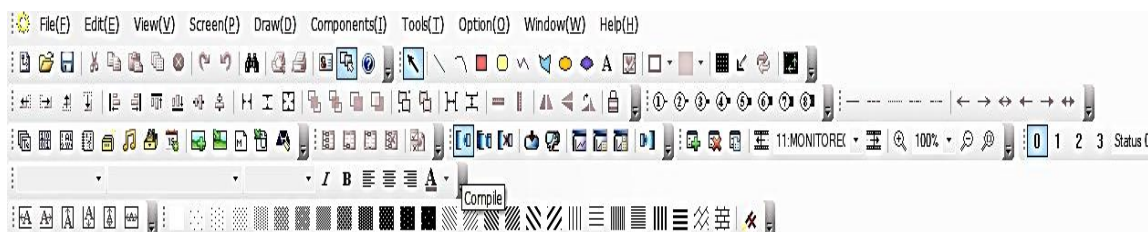


Figura 102

Botón Simular en software.



Descarga del proyecto a la HMI:

Cuando se culminé la programación y se haya verificado que todo funcione correctamente, descargar el proyecto a la HMI para que pueda ejecutarse de manera independiente en este caso se hizo mediante el puerto de programación USB2.0 (PLC e HMI ya que comparten el mismo puerto de programación).

Figura 103

Botón download en software.

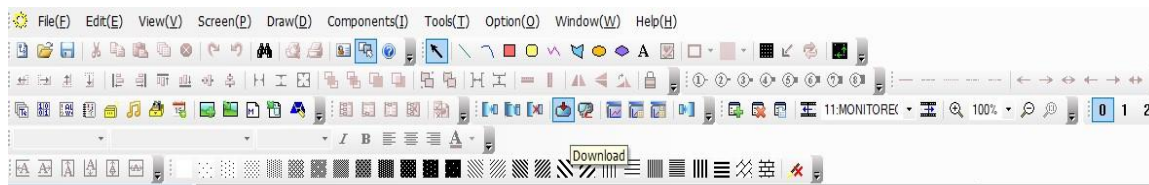
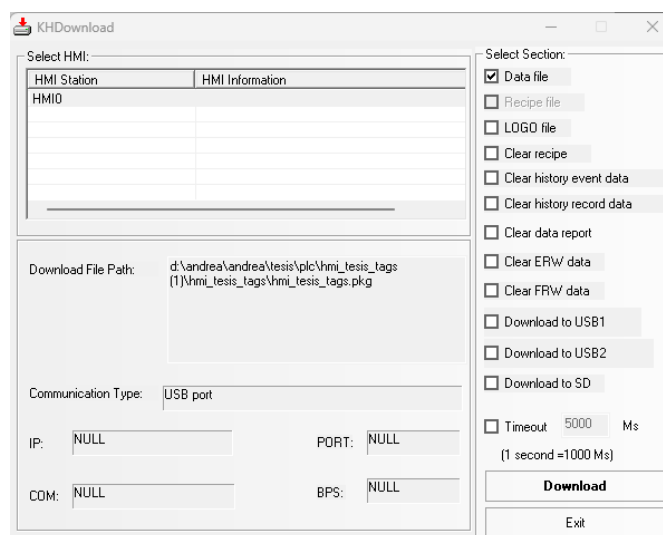


Figura 104

Ventana KHDownload.



Capítulo IV: Integración y Resultados

Integración del sistema

Construcción de sistema mecánico

Se construye la estructura de acuerdo con lo que se expuso y se analizó en el capítulo 3, siendo este de perfiles cuadrados de 40x40x1.5mm y planchas de acero de 3mm de espesor.

Se adquirió dos tanques cuadrados de acrílico de 4mm de espesor los cuales han sido destinados para ser de reserva y control de nivel, al ser de este material proporcionan resistencia al impacto, aislamiento eléctrico y posee un peso del 50% más ligero en comparación con el vidrio.

Montaje de tuberías

Para el sistema de tuberías se utilizó tubería de PVC plegable cédula 40 de 1" mayormente para el recorrido de llenado del tanque de control empezando desde el tanque de reserva, en el caso de la tubería de 1/2" para la descarga desde el tanque de control al tanque de reserva y para la sección de retorno al tanque de reserva. Se hizo uso de accesorios como: tees, codos, uniones universales, adaptadores de tanque, adaptadores macho, adaptadores hembra, reducciones bushing, válvulas de bola, válvula check y manómetros de tubo bourdon.

A continuación, se realiza una descripción de cada accesorio principal:

Uniones universales: Se hizo uso de uniones universales de 1" y 1/2" a lo largo del sistema de tuberías, con el objetivo de que se pueda desmontar los elementos principales del sistema cuando sea necesario para poder dar mantenimiento.

Válvulas de bola: Como By pass para las válvulas de descarga y retorno. Las demás tienen la finalidad de detener el flujo de agua para desmontar los demás accesorios del sistema cuando sea necesario.

Válvula check: Tiene como función servir como dispositivo de control de fluidos proporcionando mayor rapidez, protegiendo a la bomba y otros elementos del sistema.

Manómetro: Se colocó tres manómetros a lo largo del sistema para indicar la diferencia de presión en las tres secciones. Estos instrumentos poseen un rango de 0-150psi.

Figura 105

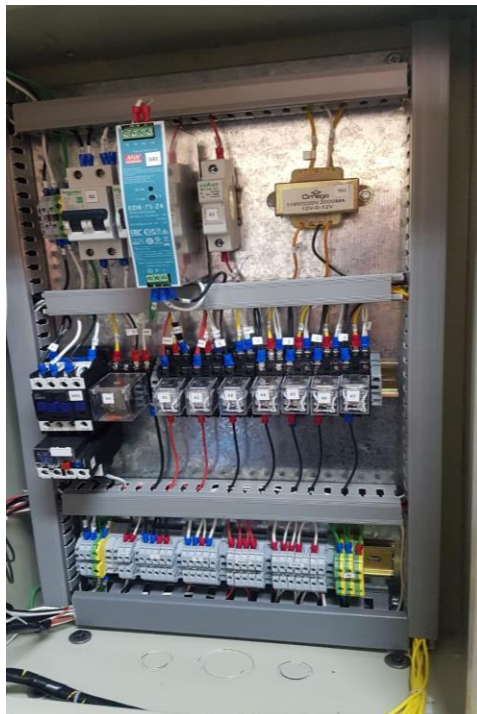
Construcción de sistema de tuberías.



Construcción del sistema eléctrico – electrónico

Figura 106

Montaje de elementos eléctricos en tablero de control.



Elementos de cableado y construcción

Las conexiones eléctricas se realizaron con cable flexible AWG 14 para el circuito de fuerza o potencia y el cable flexible AWG 18 para el circuito de control. También se usó terminales para cables según su forma los cuales son de tipo horquilla y de pin afilado mayormente, por otro lado, se colocó terminales de forma tipo faston y terminal ojal para los cables de los sensores de nivel para mayor facilidad de desconexión en caso de requerir hacer mantenimiento. Adicionalmente se colocó etiquetas para marcar los cables permitiendo identificar cada conductor, facilitando la construcción y mantenimiento del cuadro.

Para la fijación de cables se utilizó canaletas, espirales y bridas para mayor libertad de movimiento en la puerta del tablero.

A continuación, se enlistan los elementos específicos de esta sección con su modelo y cantidad utilizados:

- Interruptor termomagnético Schneider 2P 10A.
- Interruptor termomagnético Schneider 1P 6A.
- Porta fusible 32A Ebasee y fusible 4A CGC.
- Fuente de alimentación de 24VDC Mean Well.
- Transformador 110V-24VAC.
- Contactor bobina 110/120 VAC CGC.
- Relé térmico 5.5-8A Ebasee.
- Relé encapsulado de 8 pines bobina 24V DC CGC.
- 7 relés encapsulados de 8 pines bobina 24V DC Camsco.
- 33 borneras.
- 11 topes de borneras.
- 4 puentes equipotenciales.
- Canaleta plástica ranurada 25x40mm, longitud de 2m.

- 5 luces piloto 110V CSC.
- Botón paro de emergencia.
- Selector dos posiciones.
- Pulsador color rojo y pulsador color verde.
- 9 metros cable flexible 14 AWG color negro incable.
- 9 metros cable flexible 14 AWG color blanco incable.
- 9 metros cable flexible 14 AWG color verde incable.
- 10 metros cable flexible 18 AWG color rojo incable.
- 10 metros cable flexible 18 AWG color blanco incable.
- 13 metros cable flexible 18 AWG color azul incable.
- 10 metros cable flexible 18 AWG color amarillo incable.
- 4 prensaestopas PG16.
- 3 metros de manguera corrugada de ½”.

Consideraciones técnicas de montaje e instalación para evitar las perturbaciones electromagnéticas

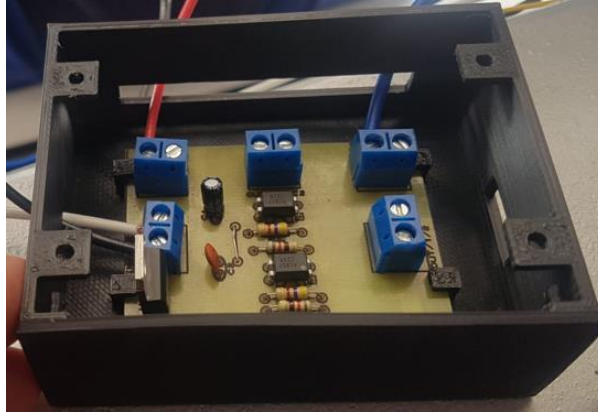
Las partes metálicas de instalación y del tablero están interconectadas entre sí para crear masa de referencia y se tiene cuidado con los contactos metal - metal.

Placa PCB de circuito optoacoplador

Se coloca la placa PCB de acuerdo con lo especificado en el diseño de acondicionamiento de sensores de caudal. Adicionalmente, se utilizó borneras de unión simple para la conexión de los cables de alimentación de los sensores, los cuales estarán colocados en una caja que tiene modelo de cajetín.

Figura 107

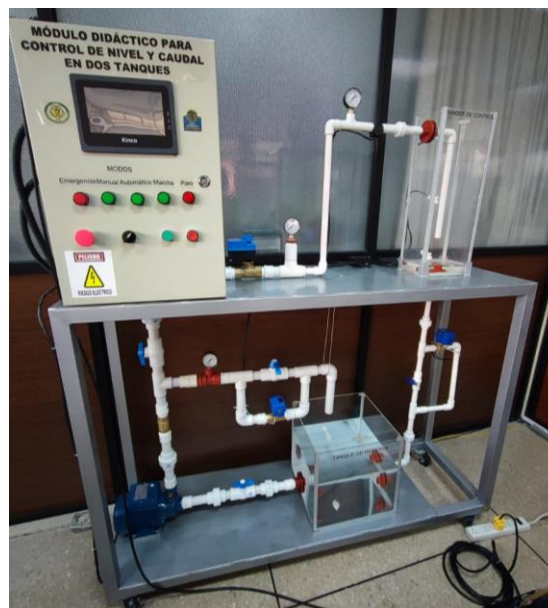
Placa PCB de circuito optoacoplador.



Finalmente, luego de haber adquirido todos los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos se realiza el ensamble final del módulo. Primero se colocó todos los componentes mecánicos empezando por el sistema de tuberías en base a las dimensiones de la estructura metálica y demás componentes que ejercen mayor carga. Luego se colocó todos los elementos eléctricos y electrónicos luego de realizar análisis previos descritos en los capítulos anteriores.

Figura 108

Ensamble final de módulo didáctico



Calibración de los sensores de caudal

Para poder obtener una correcta lectura del caudal por parte de los sensores de flujo, se procede a realizar la calibración, esto se logra llenando el tanque de control hasta un volumen de agua fijo que sea conocido y leyendo el número de pulsos que nos entregan estos sensores. Con esto se logra obtener el factor de conversión (K), adecuado para luego poder realizar la conversión a litros/min.

$$K = \frac{n^{\circ} \text{ pulsos}}{\text{Volumen} * 60}$$

Tabla 14

Calibración de los sensores de flujo

N° Pulsos Sensor Flujo 1"	N° Pulsos Sensor Flujo ½"	Volumen (litros)	K1	K2
620	876	2	5.17	7.30
622	889	2	5.18	7.41
613	863	2	5.11	7.19
625	884	2	5.21	7.37
913	1312	3	5.07	7.29
917	1308	3	5.09	7.27
901	1281	3	5.01	7.12
911	1308	3	5.06	7.27
1211	1730	4	5.05	7.21
1186	1710	4	4.94	7.13
1184	1685	4	4.93	7.02
1208	1733	4	5.03	7.22
Promedio			5.06	7.23

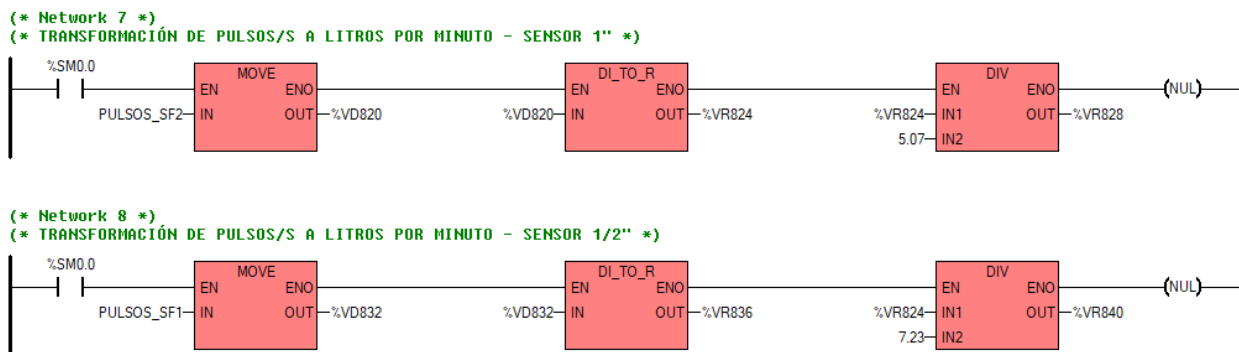
Con esto tenemos que los valores de las constantes para cada una de las constantes, es 5.07 para el sensor de flujo de 1" y 7.23 para el sensor de flujo de ½", y se puede aplicar la fórmula:

$$\text{Flujo de agua (L/min)} = \text{Pulsos del sensor (Hz)} / \text{factor de conversión}$$

Este constante encontrada se la usa en programación del PLC, para poder obtener el caudal el l/min como se indica a continuación:

Figura 109

Transformación de pulsos/s a litros/minuto en la programación



Verificación de funcionamiento y Resultados

Para poder verificar el funcionamiento del equipo, se procede a poner el equipo en cada una de las etapas del proceso tanto en los modos manual como automático.

Al conectar el equipo, en la pantalla HMI, observamos la pantalla de inicio del sistema.

Figura 110

Pantalla de inicio al encender el sistema



A continuación, en la pestaña de Supervisión, podemos observar que el equipo se encuentra en estado de emergencia, esto es debido a que el equipo, siempre iniciará con el pulsador de emergencia del tablero eléctrico activado, como precaución.

Figura 111

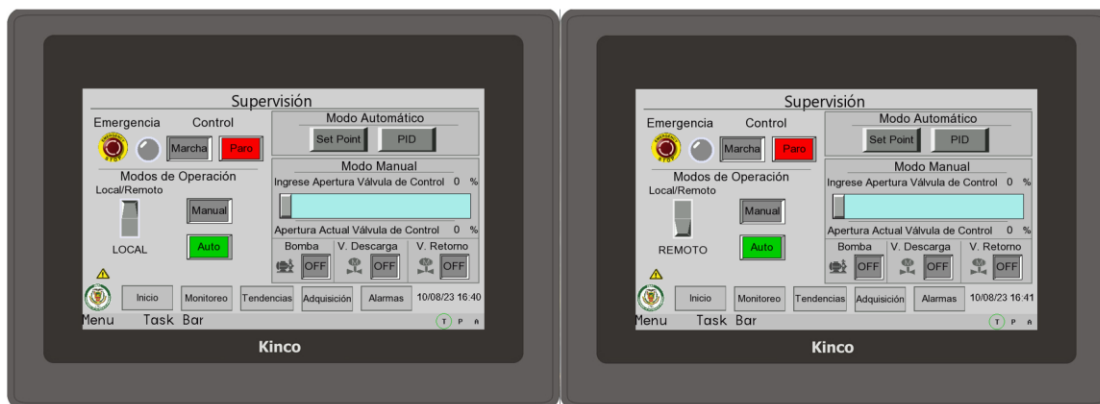
Módulo en estado de emergencia



Luego, al desactivar el paro de emergencia, el equipo se encuentra en estado de paro, para que el equipo entre en marcha, primero se debe seleccionar el modo de operación, este puede ser de manera manual o automática, y esto se lo puede seleccionar de manera local en el tablero o de manera remota en el HMI, en este caso se selecciona el modo remoto, para poder controlar todo el proceso desde la HMI.

Figura 112

Selección de local / remoto



A continuación, se selecciona el modo de trabajo, en este caso, se empieza por el modo manual.

Figura 113

Selección modo manual



En el modo manual, es posible realizar la apertura de la válvula de control, en un valor de porcentaje de 0 a 100%, el valor se lo puede ingresar a través de un slider o ingresando un valor a través de un teclado número que aparece en la pantalla, y encender los elementos que

se encuentran en el módulo. Para encender los elementos, primero el equipo se deberá poner en marcha.

Figura 114

Ingreso de apertura de la válvula de control al 13%



Figura 115

Ingreso de apertura de la válvula de control al 50%



Figura 116

Ingreso de apertura de la válvula de control al 80%



Figura 117

Ingreso de apertura de la válvula de control al 100%



Figura 118

Puesta en marcha del modo manual



Figura 119

Modo manual: encendido de la bomba



Figura 120

Modo manual: encendido de válvula de descarga



Figura 121

Modo manual: encendido de válvula de retorno



Una vez verificado el funcionamiento del modo manual, se procede a verificar el modo automático, para poder realizar este proceso sin tener que desconectar el equipo, se deberá activar el botón de emergencia, ya sea de la HMI o del tablero, y así se podrá cambiar de modo, al desactivar el botón.

Figura 122

Módulo en emergencia para realizar el cambio de modos

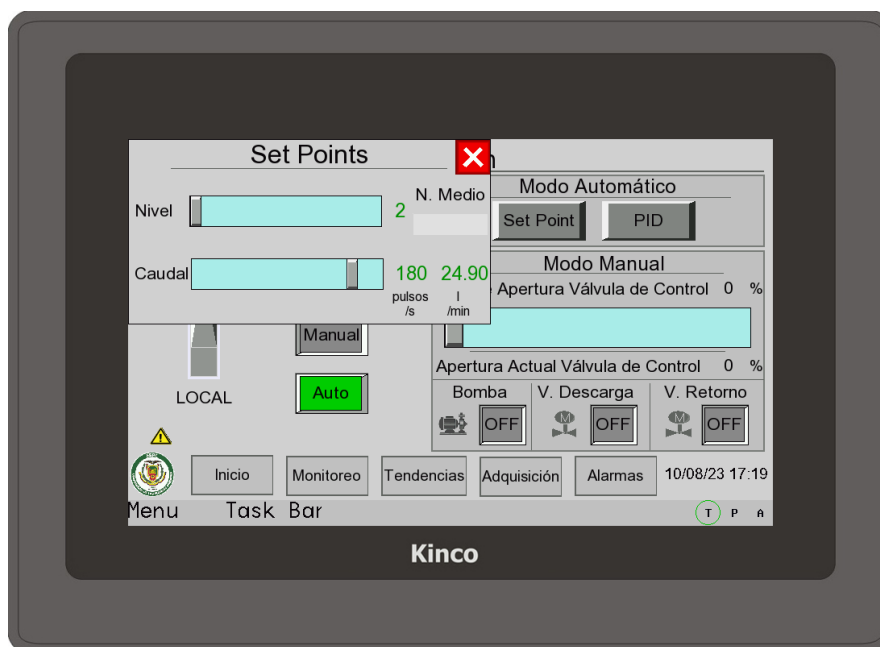


Figura 123*Selección del modo automático*

Al igual que el modo manual, el proceso inicia en paro, y para dar inicio al proceso, se deberá activar marcha, ya sea en el tablero o en el HMI. Además, antes de iniciar el proceso se configura los set points tanto de nivel como de caudal, el valor por defecto de nivel, es el nivel medio, y para el caudal, 180 pulsos por segundo. Además, también es posible configurar los valores de las constantes del controlador PID.

Figura 124

Valores por defecto de set point de nivel y caudal

**Figura 125**

Selección del set point de nivel: Nivel alto

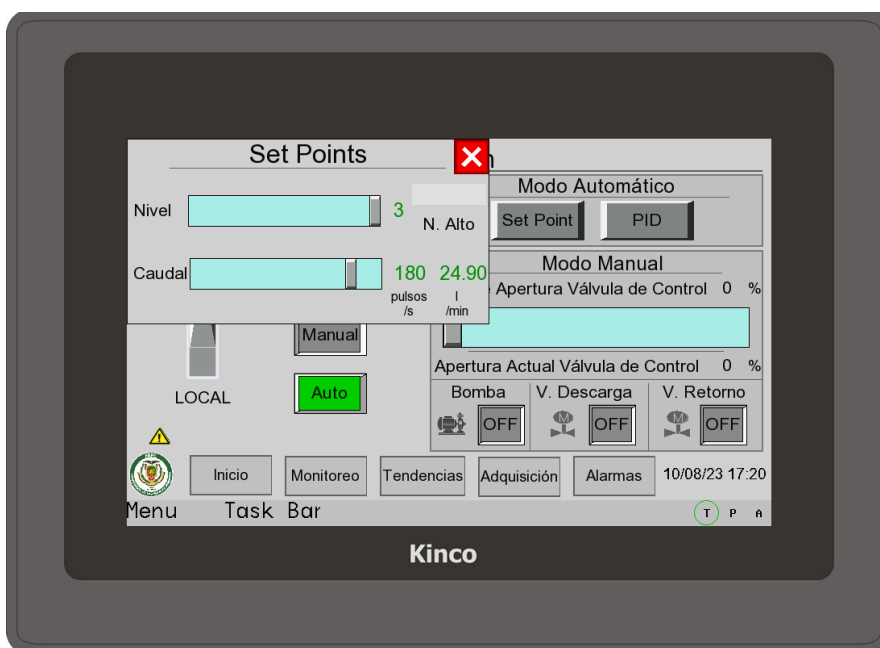
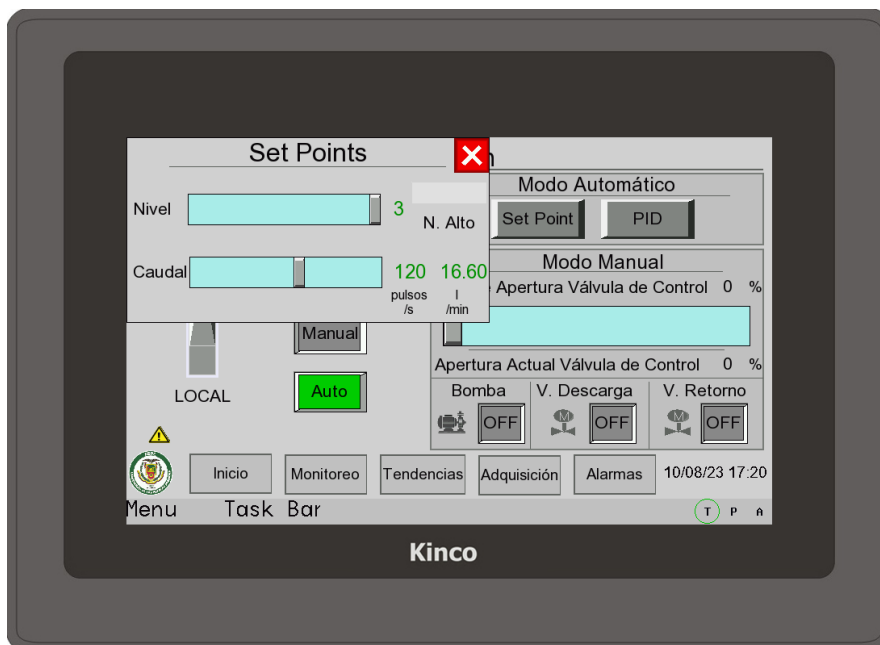


Figura 126

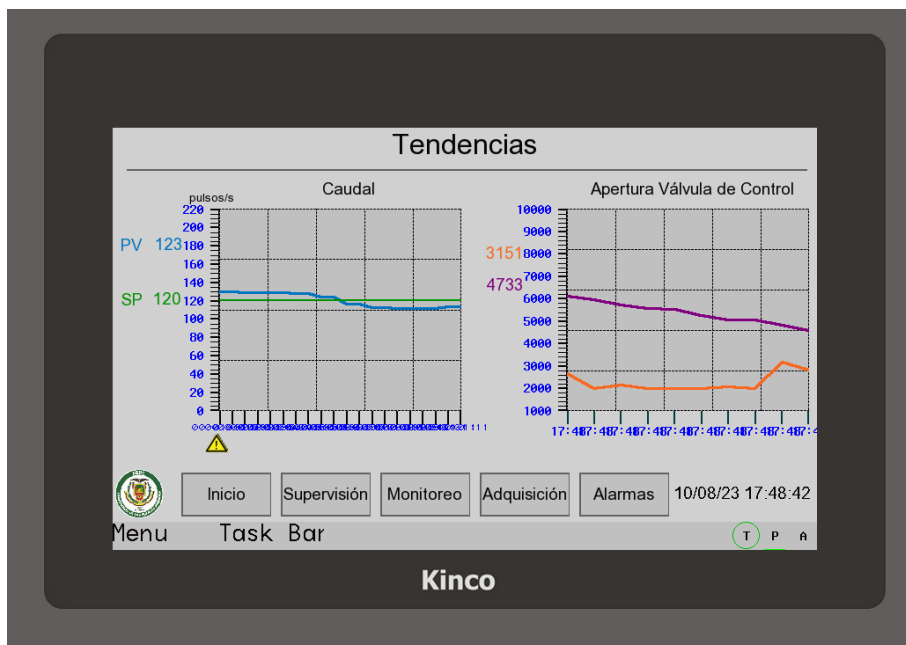
Selección del set point de caudal: 120 pulsos por segundo



Una vez ya establecidos los valores de las variables deseados, se da marcha al proceso, y se procede a observar en el apartado de tendencias, las gráficas, especialmente la de caudal, que nos indica el set point deseado y en el que actualmente se encuentra.

Figura 127

Pestaña de tendencias: Set Point Caudal, 120 pulsos/s



Cómo se puede observar, el control PID, funciona de manera correcta, el valor deseado de caudal es de 120 pulsos/s y el valor actual que nos entrega el caudal es de 123 pulsos/s, esto representa un error del 2.5%. Para lograr un mejor resultado, es posible modificar las constantes del controlador PID, tanto K_p , T_i y T_d .

Las constantes finales del controlador PID, son las siguientes:

$$K_p = 10.0$$

$$T_i = 2.0$$

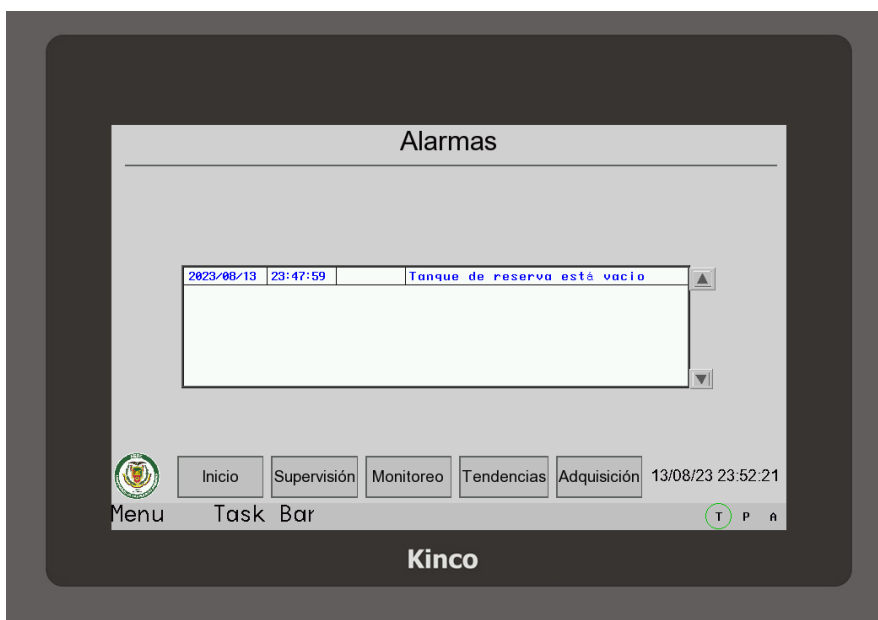
$$T_d = 1.0$$

Para el control On/Off, se puede verificar que la bomba se apaga, cuando se llega el setpoint deseado, ya sea el nivel medio o nivel alto, por lo que este control está funcionando de manera correcta.

Finalmente verificamos las alarmas para ello inicialmente se identifica cuáles son los posibles casos y su prioridad. Por lo tanto, tenemos como principales las siguientes: cuando el tanque de reserva está vacío no es posible ejecutar el proceso de funcionamiento del módulo, si se selecciona la opción de llenar el tanque hasta el nivel alto no será válido seguir llenando y en el caso que de una situación de emergencia se activará la luz de emergencia. Se presentarán mensajes de alerta en todas las ventanas de la HMI según el caso que se presente, los cuales pueden ser de advertencia, precaución y de atención inmediata por el usuario. Adicionalmente, se cuenta con una ventana propia de Alarmas donde se almacenará los eventos de emergencia.

Figura 128

Ventana de Alarmas: Tanque de reserva con nivel de agua insuficiente.



Guías de Laboratorio

Se establecen tres guías prácticas que se pueden realizar sobre el módulo didáctico, que serán detalladas a continuación:

Guía 1. Reconocimiento de elementos del módulo didáctico

Tema: Reconocimiento de elementos del módulo didáctico

Objetivo: Identificar los elementos mecánicos, electrónicos, eléctricos y de control que componen el módulo para conocer su funcionamiento.

Equipo Necesario:

Multímetro

Procedimiento:

1. Revisar el manual de uso del módulo del equipo.
2. Identificar los sensores y actuadores del módulo.
3. Conectar el módulo, verificar que el paro de emergencia se encuentra activado. Con un multímetro comprobar los diferentes voltajes que se encuentra en el tablero.
4. Identificar los diferentes elementos de potencia y control dentro del tablero eléctrico.
5. Activar el modo manual del equipo, y verificar el funcionamiento de cada uno de los actuadores.
6. Apagar el equipo.

Cuestionario

1. Definir las características principales de actuadores y sensores.
2. Definir las características de los principales elementos de potencia del equipo.
3. Conclusiones y Recomendaciones.

Guía 2. Modelo matemático del módulo didáctico

Tema: Modelo matemático del módulo didáctico

Objetivo: Realizar la modelación matemática de la planta usando la variable de caudal

Equipo Necesario:

Computador con los siguientes softwares: Kinco HPBuilder, Kinco Builder

USB Flash (opcional)

Procedimiento:

1. Revisar el manual de uso del módulo del equipo.
2. Identificar los sensores de caudal.
3. Conectar el módulo, verificar que el paro de emergencia se encuentre activado.
Seleccionar el modo manual, y proceder a encender la bomba, llevando la apertura de la válvula de control desde 0% (completamente cerrada) hasta 100% (completamente abierta).
4. Obtener los datos de lectura de caudal y de posición de la válvula, estos se guardan en el computador en un archivo .csv en la ruta C:\Kinco\Kinco HPBuilder v1.1\disk\usb1\trend\HistryData, o de forma adicional, colocar una unidad de memory flash en el PLC.
5. Con el uso del software matemático Matlab, realizar la modelación de la planta usando los datos obtenidos.
6. Analizar el comportamiento de las plantas obtenidas.

Cuestionario

1. Describir los elementos usados para la obtención de los datos.
2. Identificar el modelo adecuado que corresponde al módulo didáctico.
3. Realizar el análisis de polos y ceros.
4. Conclusiones y Recomendaciones.

Guía 3. Control PID

Tema: Regulación del control PID

Objetivo: Realizar el modelo de controlador del módulo didáctico.

Equipo Necesario:

Computador con el software Matlab

Procedimiento:

1. Revisar el manual de uso del módulo del equipo.
2. Con la planta obtenida en la práctica anterior, proceder a seleccionar un controlador y realizar su modelo matemático, obtener las constantes necesarias K_p , T_i o T_d .
3. Conectar el módulo, verificar que el paro de emergencia se encuentra activado.
Seleccionar el modo automático, modificar los valores del controlador, y observar su comportamiento en la pestaña de Tendencias.
4. Apagar el equipo.

Cuestionario

1. Describir como se desarrolló el controlador.
2. Describir cuál controlador obtuvo la mejor respuesta en la planta.
3. Conclusiones y Recomendaciones.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El diseño general del equipo cumple con lo planteado en el objetivo general del proyecto y los requisitos, se logra implementar una lógica de control donde se incluyan el modo manual y automático del equipo, un paro de emergencia, un controlador on/off para la variable nivel cuyo actuador es la bomba y un controlador PID para la variable caudal, cuyo actuador es una válvula de bola proporcional motorizada. Además, se logra monitorear todo el proceso a través de una HMI. Se establecen una guía de prácticas básicas que podrán ser usadas por los estudiantes, estas permiten identificar los elementos de todo el módulo, observar cuál es modelo matemático de la planta, poder obtener y verificar el funcionamiento del controlador PID.

Para poder leer el valor de los sensores de flujo en el PLC, se tuvo que realizar una placa PCB para acondicionar la señal usando un optoacoplador, debido a que estos entregaban trenes de pulsos de 0 a 5V, mientras que el PLC, idealmente lee señales de 0 a 24V, aunque con la hoja de datos se verifica que la lógica 0 hasta 5V y la lógica 1, desde los 11V.

Para los sensores de flujo, una vez obtenida la señal en el rango correcto de voltaje, se configuró de manera adecuada el PLC donde se activó los contadores rápidos (HSC) para poder obtener los pulsos por segundo, y luego trabajar con estos valores.

Con la ayuda de pruebas experimentales, se logró calibrar el sensor de flujo de manera que permita obtener el valor de caudal correcto en litros por minuto, para el sensor de 1" este valor fue de 5.03 y para el sensor de 1/2" este valor fue de 7.23.

Con el cálculo de caudal respecto al volumen de tanque, tubería de vaciado y tiempo de llenado se obtuvo un valor de 28.674 L/min, dicho valor fue aproximadamente cercano al valor obtenido en la programación Ladder cuando se hizo la transformación de pulsos/s a l/min con la válvula de control en una posición de apertura cercana al 100%.

Para la válvula de control, el fabricante indica que la válvula trabaja en un rango de 0 a 10V, sin embargo, al realizar las pruebas, se determina que el rango de trabajo de la válvula es de 2V (completamente cerrada) y 9.9V (completamente abierta), además la señal de control como de retroalimentación, que se debe enviar y leer desde el PLC, es en milivoltios.

Para poder enviar información desde el PLC hacia el HMI, o viceversa, se debe configurar de manera adecuada el espacio de memoria a usarse, en este caso, el área de memoria V, fue el correcto a usarse debido a que es el área de memoria retentiva del equipo.

Con la ayuda de la HMI, es posible modificar algunos parámetros directamente sin tener que modificar la programación Ladder del PLC, se logra establecer el set point para nivel (nivel medio o alto) y para el caudal (0 a 210 pulsos/s), además de los valores del controlador PID (Kp, Ti y Td). Igualmente, para el caudal, se puede visualizar el valor en litros/min.

Dentro del programa del PLC se usan bloques de escalamiento, como es en el modo manual, para la apertura y cierre de la válvula, en este caso se lo realiza en un porcentaje del 0 a 100%, que en la señal del proceso es 2000 a 9900 milivoltios.

El tablero eléctrico del equipo es montado de manera que se asemeje lo más cerca posible a lo que es un entorno industrial, así como lo es el uso de un PLC y una HMI, con estos últimos, los estudiantes tendrán la posibilidad de diseñar sus propias lógicas programación, usando esquemas como Grafcet, y así mismo poder manipular de manera directa los valores de las variables nivel y caudal, que son muy usadas en la instrumentación y control de procesos en la industria.

Recomendaciones

Revisar el manual de usuario y seguir las instrucciones de uso, para la activación, funcionamiento, programación, medidas de seguridad y mantenimiento del módulo didáctico, así como para lograr un buen rendimiento del módulo.

Para lograr que el módulo didáctico sea más eficiente se recomienda, implementar una medición de nivel continua en el tanque de control, esto puede ser con un sensor ultrasónico, que permite conocer el nivel actual del agua a lo largo de todo el tanque.

La lógica de control que rige a la lógica de programación en lenguaje Ladder del PLC se puede modificar de manera que, exista otro modo de funcionamiento del equipo, especialmente en el modo automático.

Bibliografía

- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Pearson Educación.
- Aza Saraguro, L. R., & Bastidas Carlosama, D. R. (2017). Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico para el Control de Caudal de Líquidos en el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, Periodo 2015. 2015, 20.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica* (5ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers* (6ª ed.). Elsevier.
- Bolton, W. (2021). *Instrumentation and Control Systems* (3ª ed.). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823471-6.00014-9>
- Creus Solé, A. (2011). *Instrumentación industrial* (8ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Dickeson, C. (1999). *Valves, Piping and Pipelines Handbook* (3ª ed.). Elsevier.
- Gandhi Carvajal, C. J. (2015). *Diseño e Implementación de un Sistema Modular Didáctico para Control de Nivel, Caudal y Presión para el Laboratorio de Automatización Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Gausemeier, J. G., & Moehring, S. (2003). *New Guideline VDI 2206—A flexible procedure model for the design of mechatronic systems*. https://www.designsociety.org/download-publication/23949/new_guideline_vdi_2206-a_flexible_procedure_model_for_the_design_
- Groover, M. (2016). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4ª ed.). Pearson.
- Hollifield, B. R. (2021). *Maximize Operator Effectiveness: High Performance HMI Principles and Best Practices*. Hexagon.
- Lipták, B. G. (Ed.). (2003). *Instrument engineers' handbook* (4ª ed.). CRC Press.
- Martín, J. C., & García, M. P. (2012). *Automatismos industriales* (1ª ed.). Editex.

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta). Pearson Educación.

Naylamp Mechatronics. (12 de junio de 2023). *Sensor de nivel de líquido horizontal*. Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/84-sensor-de-nivel-de-liquido-horizontal.html>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ª ed.). Pearson Educación.

Prefacio—Física universitaria volumen 1 | OpenStax. (s/f). Recuperado el 11 de julio de 2023, de <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/prefacio>

Rehg, J. A., & Sartori, G. J. (2014). *Programmable logic controllers* (2ª ed.). Pearson Education Limited.

Salazar, F., & Hernández, J. (2008). *Selección de equipo de bombeo para un sistema de suministro de agua*. [Unidad Profesional ESIME Azcapotzalco]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/38/TESIScortessalazar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Soluciones Sergio. (2019). *USO DEL OPTO-ACOPLADOR (PC817)*.

<https://electronicabasica00.blogspot.com/2019/02/uso-del-opto-acoplador-pc817.html>

Zappe, R. W., & Smith, P. (2004). *Valve selection handbook: Engineering fundamentals for selecting the right valve design for every industrial flow application* (5ª ed.). Elsevier.

Apéndices