



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

TEMA: MÓDULO DIDÁCTICO PARA PRUEBAS DE SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN CON PLANTA DE 3 TANQUES

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: Joan Alexander Saldaña García

TUTOR: Franklin Illich Kuonquí Gaínza

Guayaquil - Ecuador

2023

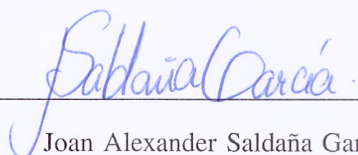
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Joan Alexander Saldaña García** con documento de identificación N° **0955729363**; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Joan Alexander Saldaña García
0955729363

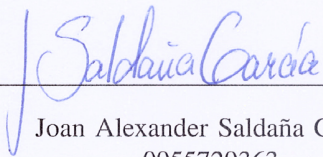
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Joan Alexander Saldaña García** con documento de identificación N° **0955729363**, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del **Dispositivo Tecnológico: MÓDULO DIDÁCTICO PARA PRUEBAS DE SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN CON PLANTA DE 3 TANQUES**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



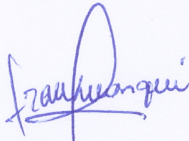
Joan Alexander Saldaña García
0955729363

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Franklin Illich Kuonquí Gaínza**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **MÓDULO DIDÁCTICO PARA PRUEBAS DE SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN CON PLANTA DE 3 TANQUES**, realizado por **Joan Alexander Saldaña García** con documento de identificación N° **0955729363**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Franklin Illich Kuonquí Gaínza, Mg.
0909627432

DEDICATORIA

El proyecto está dedicado principalmente a mi madre, quien siempre me ha brindado un apoyo incondicional para alcanzar mis metas, y a mi padre, quien desde el principio creyó en mí y me brindó su apoyo y enseñanzas en numerosas ocasiones.

También dedico este proyecto a mi hermano, quien siempre me ofreció una perspectiva diferente para resolver mis problemas y ha sido una fuente de inspiración desde muy joven.

Por último, quiero dedicar este proyecto a mis familiares, quienes han sido una fuente de aliento constante con pequeñas frases inspiradoras que me han motivado a continuar. Así también, dedico este proyecto a mi persona especial que ha sido un gran apoyo durante todos mis años en la carrera.

Joan Alexander Saldaña García

AGRADECIMIENTO

Principalmente, agradezco a Dios por mis logros, a mamá y papá, quienes siempre estuvieron a mi lado cuando más los necesitaba. También quiero agradecer a mi familia, que ha sido un pilar fundamental en mi vida.

Agradezco a los docentes de la carrera por todas sus enseñanzas, han demostrado ser excelentes guías a lo largo de mi formación académica.

Para terminar, quiero expresar mi gratitud a mis amigos, por su apoyo, por demostrar ser personas excepcionales y por todos los buenos momentos que enriquecieron mi camino.

Joan Alexander Saldaña García

RESUMEN

El siguiente proyecto de titulación consiste en la reestructuración del diseño del trabajo de titulación “Análisis del Control PID de un Sistema Didáctico de Tanques”. Esta nueva planta utilizará 3 tanques interconectados con el propósito de brindar a los estudiantes y profesores la oportunidad de realizar prácticas de sistemas controlados y automatizados. Estos tanques estarán equipados con un sistema de llenado de agua mediante el uso de bombas eléctricas, permitiendo establecer perturbaciones mediante una válvula de bola.

El diseño permitirá la recopilación de los datos necesarios para desarrollar un controlador PID, el cual será operado a través de una pantalla HMI. Esta interfaz permitirá ajustar los valores del SetPoint para controlar la altura del agua a la que se desea realizar la estabilización, misma que será monitoreada mediante el uso de sensores de presión hidrostática, los cuales determinarán el nivel utilizando la presión generada por la columna de agua mencionada anteriormente, y entregando una señal eléctrica que será transformada a voltaje y posteriormente ingresará al PLC (Programmable Logic Controller).

Palabras claves: Sistema SISO, SetPoint, sistemas de control, automatización, controlador PID.

ABSTRACT

The following degree project consists of the restructuring of the design of the degree work “Analysis of the PID Control of a Didactic Tank System”. This new plant will use 3 interconnected tanks with the purpose of providing students and professors the opportunity to practice controlled and automated systems. These tanks will be equipped with a water filling system through the use of electric pumps, allowing the establishment of disturbances by means of a ball valve.

The design will allow the collection of the necessary data to develop a PID controller, which will be operated through an HMI screen. This interface will allow adjusting the SetPoint values to control the height of the water to be stabilized, which will be monitored through the use of hydrostatic pressure sensors, which will determine the level using the pressure generated by the column of water mentioned above, and delivering an electrical signal that will be transformed to voltage and then enter the PLC (Programmable Logic Controller).

Keywords: SISO system, SetPoint, controlled systems, Automation, PID controller.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	12
II.	PROBLEMA	13
III.	OBJETIVOS	14
III-A.	Objetivo General	14
III-B.	Objetivos Específicos	14
IV.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
IV-A.	Sistemas secuenciales autónomos	15
IV-B.	Automatización industrial	15
IV-C.	Características generales de los sensores	16
IV-C1.	Sensores analógicos de corriente	16
IV-C2.	Sensores analógicos de voltaje	16
IV-C3.	Sensores de nivel	17
IV-C4.	Sensores digitales de 1 bit	17
IV-D.	Características generales de los actuadores	17
IV-D1.	Actuador hidráulico	18
IV-E.	Sistemas de control	18
IV-E1.	Control automático de lazo abierto	18
IV-E2.	Control automático de lazo cerrado	19
IV-E3.	Control PID	19
IV-E4.	Aplicación del control PID: Nivel de un tanque	19
V.	MARCO METODOLÓGICO	20
V-A.	Análisis de requerimientos	20
V-B.	Diseño de la planta	21
V-B1.	Cálculo de dimensiones	21
V-B2.	Cálculo de desempeño mecánico	23
V-B3.	Cálculo de potencias eléctricas	23
V-B4.	Selección de materiales y componentes	24
V-C.	Construcción de la planta	35
V-C1.	Etapa Hidráulica	35
V-C2.	Etapa eléctrica-electrónica	35
V-D.	Automatización y control	36
V-D1.	Configuración de sensores	36
V-D2.	Programación HMI	38
V-D3.	Programación PLC	39
V-D4.	Control por histéresis en LabVIEW	42
VI.	RESULTADOS	44
VI-A.	Planta	44
VI-B.	LabVIEW	47
VI-C.	Control PID	48
VII.	CRONOGRAMA	50
VIII.	PRESUPUESTO	52
IX.	CONCLUSIONES	53

X. RECOMENDACIONES	53
Apéndice A: Manual práctico para control PID del nivel en el tanque 1	55
Apéndice B: Marquillado de cables	71
Apéndice C: Bloque de control PID_Compact	73
Apéndice D: Comunicación entre plc y labview a través de opc server	75
Apéndice E: Programación del control por histéresis	91

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Estructura de un sistema autónomo	15
2.	Esquema de sensores con salida analógica de corriente [7].	16
3.	Esquema de sensores con salida analógica de voltaje [7].	17
4.	Bomba de agua con presión de 80 psi [11]	18
5.	Diagrama de bloques del control en lazo abierto.	18
6.	Diagrama de bloques del control en lazo cerrado.	19
7.	Esquema del control de nivel de un tanque [15].	19
8.	Esquemático inicial de la planta. Fuente: Autor.	20
9.	Dimensiones internas los tanques de trabajo	21
10.	Dimensiones internas del tanque reservorio	22
11.	Matriz de decisión por ponderación. Fuente: Autor.	24
12.	Modelado de los tanques de trabajo. Fuente: Autor.	25
13.	Modelado del Tanque reservorio. Fuente: Autor.	26
14.	Características físicas y mecánicas del acrílico. Fuente: Autor.	26
15.	Icono del entorno de análisis de tensión. Fuente: Autor.	27
16.	Iconos para crear estudios. Fuente: Autor.	27
17.	Función de restricción de caras. Fuente: Autor.	27
18.	Aplicación de presión sobre las caras del ensamble. Fuente: Autor.	27
19.	Icono para realizar la simulación del ensamble. Fuente: Autor.	28
20.	Propiedades de la resina termoplástica (acrílico) y materiales del ensamble.	28
21.	Tensiones de Von Mises	29
22.	Coefficiente de seguridad del material respecto a la construcción	29
23.	Desplazamiento general, representación de pandeo	30
24.	Propiedades de la resina termoplástica (acrílico) y materiales del ensamble.	30
25.	Tensiones de Von Mises.	31
26.	Coefficiente de seguridad del material respecto a la construcción	31
27.	Desplazamiento general, representación de pandeo	32
28.	Diseño del circuito impreso	33
29.	Diagrama electrónico para el uso de sensores	33
30.	Diagrama electrónico para el uso de bombas	34
31.	Vista exterior del tablero eléctrico	34
32.	Vista interna de tablero eléctrico	35
33.	Esquema electrónico del convertidor de señal de corriente a voltaje	36
34.	Bloques para capturar señales de entradas en PLC	37
35.	Bloques para multiplexar señal analógica	37
36.	Pantalla HMI de control manual	38
37.	Pantalla HMI de control por histéresis desde LabVIEW	38
38.	Pantalla HMI de control PID	39
39.	Definición de marcas para cada pantalla del HMI	40
40.	Bloque de inicialización del control manual	40
41.	Bloque de activación para bombas	41
42.	Bloque de salida para activación del multiplexor	41
43.	Bloque principal Cycle Interrupt	42
44.	Función PID_Compact para control de tanque 1	42
45.	Función PID_Compact para control de tanque 3	42
46.	Interfaz gráfica en LabVIEW	43
47.	Vista frontal de los tanques de trabajo	44
48.	Tanque de reserva	44
49.	Vista posterior de los tanques de trabajo	45

50.	Ubicación de bombas	45
51.	Válvula de desfogue del reservorio	46
52.	Parte frontal del tablero eléctrico	46
53.	Conexiones internas del tablero eléctrico	47
54.	Interfaz gráfica del control por histéresis en LabVIEW	47
55.	Valores de referencia	48
56.	Controlador PID en modo de optimización fina	48
57.	Parámetros establecidos por el controlador PID	49
58.	Controlador aplicado a la planta	49
59.	Cronograma de actividades anteproyecto. Fuente: Autor.	50
60.	Cronograma de actividades proyecto final. Fuente: Autor.	51
61.	Cuadro de costos para implementación de proyecto. Fuente: Autor.	52
62.	Creación de nuevo proyecto en TIA PORTAL	55
63.	ícono para crear equipo	56
64.	Información del modelo del PLC implementado en la planta	56
65.	Bloque principal de programación del PLC	57
66.	segmento de enclavamiento.	57
67.	menú para crear nuevo bloque de programa.	58
68.	Bloque de programa cycle Interrupt	59
69.	Ubicación del Bloque PID_Compact.	59
70.	PID_Compact sobre el segmento de programación.	60
71.	Conexión del PID_Compact con las marcas y contactos.	60
72.	Ubicación del botón de configuración del bloque PID_Compact	61
73.	Ajuste de parámetros básicos	61
74.	Ajustes de parámetros reales	62
75.	Parámetros de la acción de control de la salida	62
76.	Parámetros para el controlador PID	63
77.	Tratamiento de la señal analógica del sensor del tanque 1	63
78.	Menú para agregar los dispositivos	64
79.	Ventana de selección para el HMI	64
80.	Selección del dispositivo PLC para el HMI	65
81.	Árbol de herramientas visuales del HMI	65
82.	Barra de visualización e indicadores gráficos	66
83.	Disposición final de los elementos visuales para la práctica	66
84.	Enlace con la variable de acción de la barra de visualización	67
85.	Enlace con la variable de acción del indicador del set point	67
86.	Enlace con la variable de acción del indicador de nivel	68
87.	Menú para cargar programación en PLC	69
88.	Ventana de búsqueda y selección de PLC	69
89.	Ventana del compilador de programas del PLC	70
90.	Ventana de resultados del compilador del PLC	70
91.	Marquillado de cable sección 1. Fuente. Autor	71
92.	Marquillado de cable sección 2. Fuente. Autor	72
93.	Entradas del bloque PID_Compact. Fuente. [19]	73
94.	Salidas del bloque PID_Compact. Fuente. [19]	74
95.	Ícono de servidor OPC	75
96.	Ventana de configuraciones del servidor OC	75
97.	Ventana de selección para el driver del PLC	76
98.	Ventana de selección de la interfaz para la red de trabajo	76
99.	Ventana final de la configuración para canal de comunicación	77

100.	Ventana para nombrar el nuevo equipo en OPS server	77
101.	Selección de modelo de PLC	78
102.	vista de la IP del PLC desde TIA Portal	78
103.	Ingreso del IP en el OPC Server	79
104.	Modo de escaneo del dispositivo	79
105.	Tiempo de comunicación del dispositivo	80
106.	Auto Demotion del dispositivo	80
107.	Crear base de datos para el dispositivo	81
108.	Numero de puerto para la comunicación	81
109.	Parámetros comunes del dispositivo	82
110.	Opciones de dirección del dispositivo	82
111.	Ventana de Resumen de la configuración del dispositivo	83
112.	Entorno de OPC Server para agregar marcas	83
113.	Ventana para agregar las marcas de TIA Portal al OPC Server	84
114.	Ventana para crear proyectos LabVIEW	84
115.	Ventana de selección de proyectos de LabVIEW	85
116.	Ventana para crear el servicio de entrada y salida en LabVIE	85
117.	Selección del cliente OPC	86
118.	Ventana de selección para el servidor de comunicación	86
119.	Ventana emergente de recomendación	87
120.	Crear variables para las marcas del OPC Server	87
121.	Ventana para la creación de variables a partir de las marcas del OPC Server	88
122.	Resultado final luego de agregar todas las marcas	88
123.	Creación de proyecto VI desde el explorador	89
124.	Movimiento de variables hacia el entorno de programación de LabVIEW	89
125.	Variables listas para programar	90
126.	Programación en LabVIEW	91
127.	Segmento de marcas para controlar bomba 2 desde LabVIEW	92
128.	Segmento de marcas para controlar bomba 1 desde LabVIEW	92
129.	Segmento para iniciar el programa de control por histéresis	93
130.	Segmento para tratar la señal del sensor del tanque 1 para LabVIEW	93
131.	Segmento para tratar la señal del sensor del tanque 2 y 3 para LabVIEW	93

I. INTRODUCCIÓN

El módulo didáctico que se implementará tiene la tarea de realizar diferentes tipos de prácticas: en el ámbito de control lo hará por medio de un PLC, el mismo que también podrá ser utilizado para configurar un proceso automático. Esto será posible por medio de un selector que permitirá cambiar de forma fácil el tipo de práctica que se desea realizar. los estudiantes de grado pueden verse envueltos en un sistema más apegado a la realidad, ya que el módulo también contará con sensores y actuadores que podrán ser calibrados antes de desarrollar una práctica o cuando sea necesario, permitiendo tener un mejor control del sistema para setear los parámetros utilizados en las diferentes programaciones.

Con esto, se busca desarrollar el interés de los estudiantes por las materias de control y automatización poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en clases; manipulando un sistema en el que puedan visualizar cómo actúa un controlador PID bien sintonizado frente a uno que no, o a su vez realizando un proceso automático donde se aprovechen las señales de los sensores y utilicen los actuadores por medio del PLC.

Así mismo, se prevé que el módulo didáctico tendrá la oportunidad de funcionar como un módulo de pruebas para los estudiantes de posgrado, ya que por su capacidad de adaptarse a los sistemas MIMO, los estudiantes en este nivel podrían realizar modificaciones a la planta y acceder a un módulo multivariable funcional.

II. PROBLEMA

Desde hace mucho tiempo se puede hablar del concepto de automatización, como lo dice [1] son los sistemas con maquinaria que pueden realizar los procesos o tareas requeridas sin que el ser humano intervenga. Esta solución se comenzó a usar con frecuencia por la capacidad de optimizar tiempo y dinero. No obstante, es un término que tiene sus orígenes desde la construcción de simples máquinas que minimizaban la fuerza que las personas debían ejercer para realizar su labor.

Después de la revolución industrial, del desarrollo de la electrónica y la llegada de autómatas programables en el siglo pasado, la automatización industrial ha tenido que acoplarse a la demanda del consumismo global. Por esta situación las tecnologías que deben implementarse en un proceso deben ser más efectivas, más robustas y con mayor adaptabilidad para dar una respuesta eficiente dentro de las exigencias de los proyectos industriales [2].

De esa forma [3] hace referencia a los controladores lógicos programables (PLC) como elementos que contribuyeron al desarrollo de estos sistemas avanzados, gracias a su virtud de memorizar y procesar variables mediante el tratamiento de información. Así mismo como [4], [5] mencionan que los controladores PID siguen satisfaciendo las características necesarias de la industria actual por su capacidad de adaptarse al proceso mediante el principio de retroalimentación y que hacen del mismo un elemento práctico, robusto y fiable.

En la actualidad, a partir del auge de la industria 4.0, es importante que en la carrera de ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil en el campus Centenario se atienda la dificultad para hacer prácticas, ya que actualmente se realizan en módulos que simulan señales y alarmas por medio de acciones manuales que impide a los estudiantes verse envueltos en la realidad del mundo industrial.

Otro punto a tomar en cuenta es el limitante de la adaptabilidad en los módulos disponibles, ya que solo permiten realizar un tipo determinado de práctica. Por lo tanto, es indispensable que se habilite un dispositivo que permita a los estudiantes de grado aplicar los conocimientos adquiridos en clases sobre las áreas de la automatización y control industrial, para tomar datos, programar o ajustar parámetros dentro de un sistema didáctico.

A partir de esto, también es importante que los estudiantes comprendan que en la vida cotidiana los sistemas funcionan de forma múltiple Input Múltiple Output (MIMO, por sus siglas en inglés) Por lo que es apropiado que en la universidad se integren nuevos dispositivos donde se puedan probar estos tipos de sistemas, puesto que los módulos que se encuentran disponibles están perdiendo (efectividad) por toda la tecnología de la industria actual.

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo General

Repotenciar un módulo didáctico con la implementación de 3 tanques que permitan el desarrollo de pruebas para sistemas de control y automatización.

III-B. Objetivos Específicos

- Rediseñar la estructura del módulo didáctico utilizando 3 tanques que integren los sensores y las conexiones necesarias que permitan la comunicación entre la planta y los controladores para que facilite la realización de pruebas sobre el sistema.
- Implementar el modelo rediseñado de la planta para que se verifique el funcionamiento de las diferentes etapas del sistema, aprovechando diversos elementos del módulo base (anterior).
- Diseñar una práctica de control y una de automatización para que sean usadas como guía por los estudiantes de pregrado y a su vez que se verifique el rendimiento de la planta diseñada.

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

IV-A. Sistemas secuenciales autónomos

Dentro del ámbito de la industria automatizada hay que definir que todo aquello que se desea automatizar se lo conoce como planta a la cual se le aplican los procesos continuos [6].

La tendencia de la automatización de los procesos sigue aumentando progresivamente gracias a la mejora continua de la tecnología que se dispone, esto permite que comiencen a disminuir los costos de construcción e incrementar la producción [7].

En la automatización se pueden diferenciar distintos niveles:

1. **La máquina.** Es considerado el nivel en el que se automatiza una máquina, la cual realiza una tarea determinada y simple.
2. **La célula.** También conocido como grupo porque se automatizan aquellas máquinas que realizan un trabajo conjunto y complejo de forma secuencial y coordinada.
3. **La planta.** Referida en la automatización global de todo el proceso que persigue un mismo fin. Todas las máquinas que conforman una producción o sistema.
4. **La empresa.** Abarca el trabajo conjunto de los diversos departamentos que la conforman.

IV-B. Automatización industrial

Como menciona [7] la automatización de la maquinaria se define como la reacción automática de la misma, sin la intervención de un operador, a medida que se producen cambios en las magnitudes físicas o químicas medidas por los sensores que la máquina debe incorporar. En la Figura 1, se muestra como se encuentra estructurado un sistema autónomo.

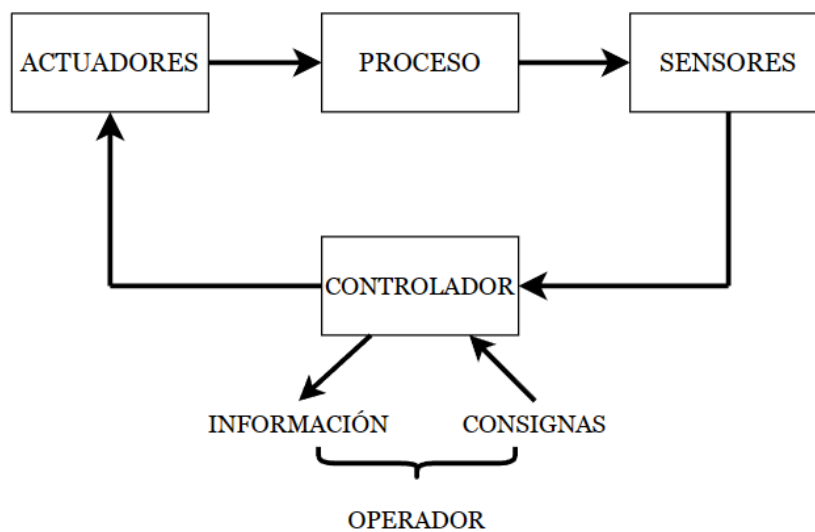


Figura 1. Estructura de un sistema autónomo

En el esquema se puede observar como las etapas forman un sistema de lazo cerrado, los datos captados por los sensores son procesados en el controlador, éste será capaz de tomar las decisiones pertinentes para el buen funcionamiento del proceso, después de realizar la comparación entre los datos y las consignas que han sido configuradas por un operador, a su vez, estas decisiones serán enviadas a los actuadores por medio de acciones en forma de pulsos discretos (activar o desactivar).

Por otro lado, se debe mencionar que, si bien se habla de automatización haciendo referencia a todo el sistema, la verdad es que suele dirigirse más a la etapa de control, ya que es donde se efectúan las acciones automáticas

por medio del procesamiento de señales que generalmente toman valores binarios (1 o 0) o señales analógicas que pueden ser corriente o voltaje.

IV-C. Características generales de los sensores

A través del tiempo se ha vuelto indispensable determinar las condiciones físicas o químicas presentes dentro de un entorno o sistema (industrial, doméstico, automotriz, etc.) para obtener datos que permitan diseñar un control sobre los equipos que los conforman.

De aquí parte el término sensor, que antiguamente estaba conformado por un mecanismo que permitía conocer el estado de alguna magnitud interferente en el medio físico; sin embargo, en la actualidad los sensores están formados de pequeños circuitos eléctricos que adquieren información del medio, aplicando los principios fundamentales de diversos fenómenos naturales [8].

Mediante estos principios se puede medir: la presión, la luz, el caudal, la temperatura, intensidad lumínica, desplazamiento, humedad, etc., dando paso a lo que se conoce como variable de medición. Produciendo como consecuencia la introducción de los sensores analógicos que como mencionan [7], [8], la señal que entrega este tipo de sensor cambia de valor con el transcurso del tiempo conforme existan alteraciones en el medio físico y siempre y cuando el rango de la magnitud medida se encuentre dentro de los límites del diseño del sensor.

IV-C1. Sensores analógicos de corriente: Suelen ser de 0 – 20 mA o también de 4 – 20 mA y son muy utilizados en la industria por conservar su valor a lo largo de todo el sistema, bajo el criterio conocido de que la corriente en un circuito cerrado siempre es la misma. Para esta configuración el circuito interno del receptor o controlador necesitará contar con una impedancia típica no mayor de 500 Ω . En la figura 2 se lo representa de forma esquemática

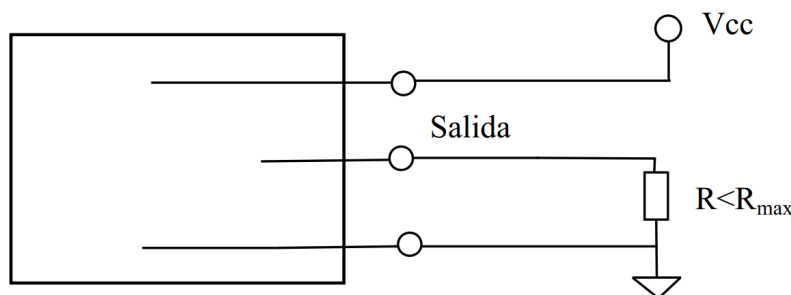


Figura 2. Esquema de sensores con salida analógica de corriente [7].

IV-C2. Sensores analógicos de voltaje: Muchas veces por facilidad de uso hay sensores que entregan una tensión a su salida de 0 - 10 V pero, necesitan que el receptor mantenga una impedancia mínima de 1 $K\Omega$. Por otro lado son menormente utilizados por ser vulnerables a caídas de voltaje que dependen de la longitud del cable que los conecta. En la figura 3 se muestra la conexión típica de un sensor con estas características.

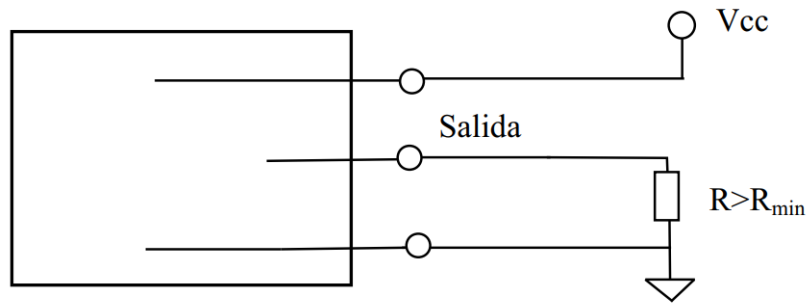


Figura 3. Esquema de sensores con salida analógica de voltaje [7].

IV-C3. Sensores de nivel: Como parte de un ejemplo para el uso de los sensores analógicos, se encuentran aquellos que ayudan a determinar la cantidad de líquido en un recipiente por medio de la presión que ejerce la altura de dicho líquido. Entre estos sensores se encuentra:

- **Sensor de nivel por presión hidrostática**

El dispositivo está conformado por una membrana que se deforma debido a la presión ejercida por la columna de líquido que se encuentra sobre él. Su funcionamiento se basa en la ecuación de presión hidrostática $P_h = \rho gh$ que debido al transductor interno facilita una salida lineal de corriente de 4 – 20 mA.

Estos sensores son mayormente aplicados en sistemas no presurizados, en esos casos se deberá implementar un segundo sensor que ayude a medir la diferencia de presiones dentro del sistema; sin embargo, hay que tener cuidado puesto que, cometer pequeños errores al calcular la diferencia entre las presiones puede producir grandes cambios en la interpretación del nivel del líquido [9].

IV-C4. Sensores digitales de 1 bit: Por otro lado, industrialmente también son utilizados diversos tipos de sensores con salidas digitales. Estos sensores funcionan con una tensión nominal de 24 VDC y cuentan con modelos que utilizan de 2 - 5 cables que permiten al sensor trabajar con diferentes configuraciones según sea el caso. A continuación, un breve repaso a las distintas configuraciones:

- **Sensor de 2 cables.** Estos funcionan básicamente como un interruptor, se conectan en serie directamente con el controlador y actúan mediante la presencia o ausencia de un fenómeno, permitiendo que el contacto interno permita o interfiera en el paso de la señal que los alimenta.
- **Sensor de 3 cables NPN.** Sensores de transistor interno que cuenta con dos cables de alimentación y un cable que permite una señal de salida, normalmente mantiene una señal binaria de 1 y al activarse el sensor esta señal cambia a su nivel bajo 0.
- **Sensor de 3 cables PNP.** Cuentan con un transistor interno que trabaja de forma invertida al sensor NPN, aparte de su alimentación, cuenta con un cable que cambia de un estado 0 a estado 1 cuando el sensor se activa.
- **Sensor de 4 cables.** Son una combinación de los dos tipos de sensores de 3 cables, cuenta con 2 cables de alimentación y 2 cables que funcionan como un transistor NPN o PNP respectivamente.
- **Sensor de 5 cables.** es el más robusto de los modelos, cuenta con un relé interno que permite trabajar con intensidades de corriente de 5A a 240V. Aparte de los 2 cables de alimentación, los 3 restantes forman parte del contacto que puede ser configurado como un contacto Normally Closed (NC) o Normally Open (NO).

IV-D. Características generales de los actuadores

Los actuadores son equipos que realizan una acción física para modificar el curso de una variable sobre la cual se está trabajando en un proceso. Estos trabajan en conjunto con los denominados preactuadores, que son aquellos dispositivos que reciben la señal proveniente del sistema de control y permiten el paso del flujo que alimenta el actuador (flujo neumático, flujo hidráulico, señales eléctricas, etc.) este flujo ejerce una fuerza que contribuye al movimiento del mecanismo interno y ayuda a realizar la acción predeterminada en el equipo [7].

IV-D1. Actuador hidráulico:

Bomba de agua por desplazamiento positivo.

Funcionan gracias al movimiento repetitivo de su diafragma, pistón o émbolo. Generalmente tienen un ciclo de acción doble, lo que permite que un lado del pistón succione mientras que el otro lado comprima y expulse el fluido de la cámara [10].

Estas bombas son utilizadas por su nivel de precisión, ya que entregan un mismo volumen por cada ciclo de trabajo y no se ven afectadas por los cambios de presión en el sistema de suministro.



Figura 4. Bomba de agua con presión de 80 psi [11]

IV-E. Sistemas de control

De acuerdo con [12], [13] se define a un sistema como la agrupación de dispositivos o elementos interconectados entre sí y que trabajan conjuntamente. Al control se lo define como el conjunto lógico que permite regular una salida a partir del procesamiento de datos que se encuentran en la entrada. Por lo tanto, un sistema de control es la agrupación de dispositivos que permiten el manejo de señales entrantes para regular una salida y cumplir una consigna determinada.

IV-E1. Control automático de lazo abierto: El control de lazo abierto se puede explicar como aquel control definido por un operador basado en la experiencia que él tiene sobre la planta en la que se trabaja. Se caracteriza por no contar con una línea de retroalimentación que permita compensar los desajustes presentes en el proceso, aunque estos se conecten en serie; no son capaces de medir las variables del entorno, por lo tanto, el control puede salirse del rango deseado de operación [14].

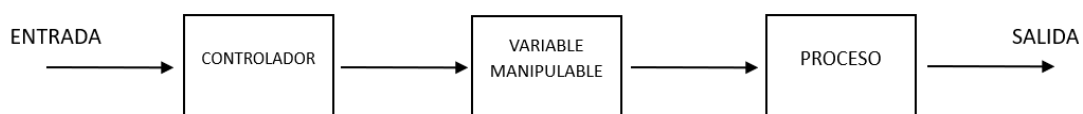


Figura 5. Diagrama de bloques del control en lazo abierto.

Este tipo de control se ve aplicado cuando un proceso solo depende de temporizadores. Por ejemplo, imaginando el control de llenado de una cisterna, un operario conoce que ésta se llena cada determinado número de minutos utilizando una bomba, a partir de esto, el operario deja configurada la bomba con el control para que funcione dentro de ese tiempo; sin embargo, puede ocurrir que el caudal de la bomba cambie y a pesar de funcionar los minutos deseados, el control no va a cumplir con su objetivo.

IV-E2. Control automático de lazo cerrado: También conocido como control feedback, es aquel que utiliza los parámetros que un operador establece (setpoint) para compararlos con los valores actuales de la planta por medio de una línea de retroalimentación, de tal forma que se mantenga la estabilidad de cualquier punto de operación dentro de un proceso. Típicamente se lo utiliza en el diseño de controladores PID para garantizar que el error entre la entrada y la salida del control se vuelva cero [14].

Utilizando el ejemplo anterior, el proceso ahora cuenta con diversos sensores conectados al controlador (sensor térmico, de presión, caudalímetro, etc.) para tener conocimiento de la mayor cantidad de variables como sea posible, el operario configura el punto de operación (setpoint) y el controlador constantemente realizará los cálculos de comparación necesarios para que el sistema de llenado funcione lo más correctamente posible.

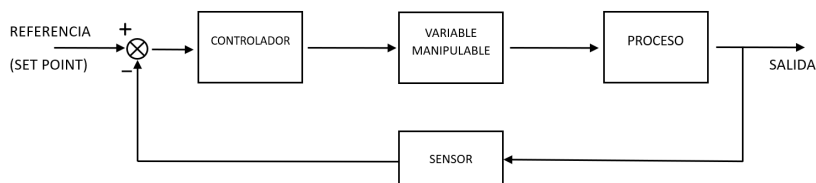


Figura 6. Diagrama de bloques del control en lazo cerrado.

IV-E3. Control PID: Como parte de los controladores automáticos en lazo cerrado, [15], [16] definen al PID como un controlador capaz de modificar el curso de las variables intervinientes dentro de un proceso. Hablando de cualquier magnitud física (calor, presión, velocidad, etc), el PID realiza el contraste de estas lecturas con el parámetro preestablecido en el punto de operación por medio de una línea de comunicación interna conocida como el feedback. Según [17] El PID se conforma por tres criterios distintos:

- **Ganancia P:** Escala el error actuante del sistema.
- **Ganancia I:** Escala la integral del error actuante del sistema.
- **Ganancia D:** Escala la derivada en el tiempo del error actuante del sistema.

IV-E4. Aplicación del control PID: Nivel de un tanque: Partiendo del esquema mostrado en la figura 7, se describe el proceso que se debe seguir para controlar el nivel de agua en un tanque. Del esquema se puede rescatar que el tanque cuenta con una entrada de agua manipulable y una válvula que actúa como resistencia para el desfogue de agua. Por experiencia, se tiene que el flujo de agua a la salida de este tipo de plantas resulta ser turbulento por lo que, se tiene que considerar al momento de modelar las ecuaciones, generalmente diferenciales no lineales [15].

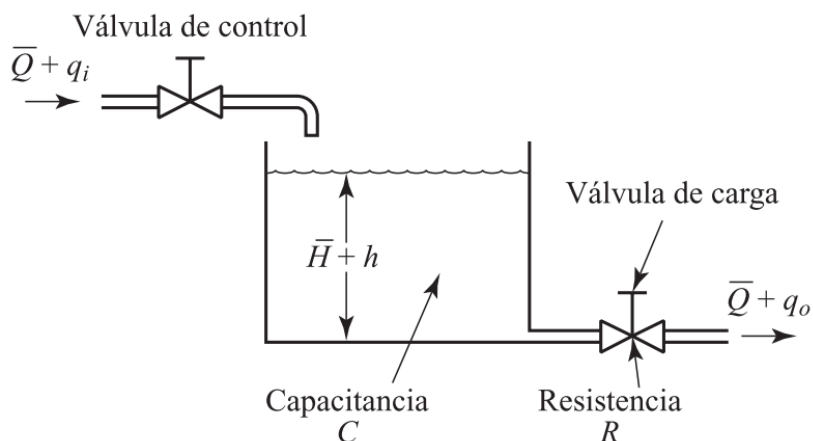


Figura 7. Esquema del control de nivel de un tanque [15].

V. MARCO METODOLÓGICO

V-A. Análisis de requerimientos

En la figura 8 se muestra el esquemático inicial de la planta, que parte de la idea de obtener un módulo que permita realizar prácticas tanto de sistemas de control como de sistemas automatizados. Este dispositivo debe contar con tres tanques interconectados entre sí, lo que permite el flujo de agua en cualquier dirección entre los tanques. Sin embargo, es importante dejar claro que, para el control de nivel en la presente trabajo de pregrado, es ideal que el flujo se mueva en una sola dirección a la vez.

Adicionalmente, la planta debe contar con un sensor de presión en cada tanque, que servirá para obtener información sobre el nivel de agua en el interior de estos. Posteriormente, con los datos recopilados, se buscará configurar un controlador PID para el nivel de agua del tanque el cual recibe directamente el fluido impulsado por la bomba. También, se proveerán válvulas de bola acopladas a los tanques para generar perturbaciones cuando sea requerido.

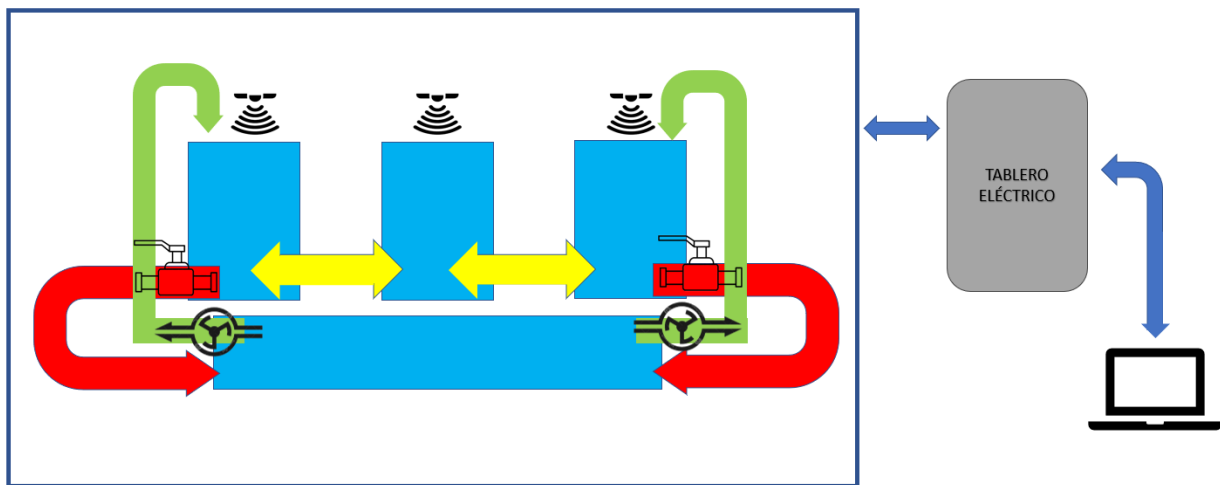


Figura 8. Esquemático inicial de la planta. Fuente: Autor.

Además, es importante destacar que la unidad de control requerida para llevar a cabo los sistemas controlados y automatizados será un PLC, con el cual implementará una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para interactuar con el usuario. En dicha interfaz se podrán manipular los parámetros del bloque de control PID_Compact, mientras se muestran las alturas de las columnas de agua en cada tanque. Por otro lado, el PLC cumplirá la funcionalidad de tarjeta de adquisición de datos para el software de LabVIEW para un manejo más flexible de la planta, como parte del cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Adicionalmente, para el diseño de la planta, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para la construcción de la nueva planta, se busca reutilizar la mayor cantidad de elementos posibles.
- Se contempla el rediseño de los tanque de trabajo y, con ello, el diseño de un tanque reservorio que abastezca la capacidad de agua consumida por toda la planta.
- Se prevé diseñar un tablero de control que permita el manejo de la planta, integrando el HMI; la conexión de los sensores, actuadores y las diferentes protecciones.
- Se considera el diseño del sistema de canalización que interconecte el reservorio, las bombas y los tanques de trabajo.

V-B. Diseño de la planta

En este apartado se desarrollarán las consideraciones anteriormente mencionadas, determinando que la altura necesaria para los tanques de trabajo será de 70 cm , utilizando por seguridad, un máximo del 85% de su capacidad total. De igual manera, se distribuirá el volumen total del tanque en tres compartimentos, cada uno de 15 cm de largo por 10 cm de ancho, para ajustarlo al espacio disponible en la mesa reutilizada del proyecto anterior. tal como se muestra en la figura 9, donde se desprecia las dimensiones de las divisiones del tanque porque solo se desea calcular el volumen de agua que se desea almacenar.

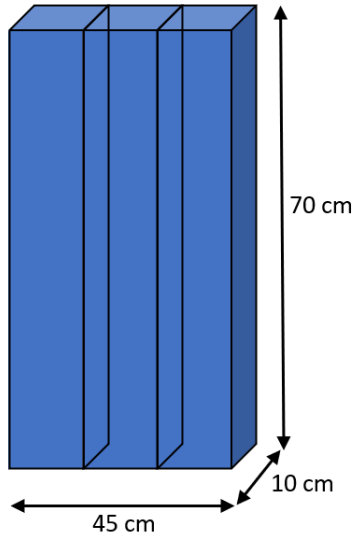


Figura 9. Dimensiones internas los tanques de trabajo

V-B1. *Cálculo de dimensiones:* En primer lugar se calculará el área y volumen interno del tanque, recordando que los niveles de los tres compartimentos nunca alcanzarán su capacidad máxima, por lo tanto.

$$A_{tanque} = Largo \times Ancho \quad (1)$$

$$A_{tanque} = 0,45[m] \times 0,1[m] \quad (2)$$

$$A_{tanque} = 0,045[m^2] \quad (3)$$

$$V_{tanque} = Largo \times Ancho \times Alto \quad (4)$$

$$V_{tanque} = 0,45[m] \times 0,1[m] \times 0,7[m] \quad (5)$$

$$V_{tanque} = 0,0315[m^3] \approx 8,32[Gal] \quad (6)$$

Asimismo, se calcula el volumen de agua contenido en las tuberías a la entrada y salida los tanques de trabajo utilizando un diámetro útil de $3/8$ [in], que corresponde al diámetro en la boquilla de salida de las bombas disponibles. Así también es como queda determinado el diámetro para todos los acoples de entrada y salida entre los tanques. Esto se realiza por una distancia de 3.1 [m], y el resultado es el siguiente:

$$3/8'' = 9,5[mm] \quad (7)$$

$$V_{mangueras} = Largo \times \pi r^2 \quad (8)$$

$$V_{mangueras} = 3,1[m] \times \pi 0,0095^2[m^2] \quad (9)$$

$$V_{mangueras} = 0,0008[m^3] \approx 0,21[Gal] \quad (10)$$

A partir de estos resultados y considerando la cantidad de espacio disponible en la mesa de trabajo. Por lo tanto, se busca dimensionar un reservorio que contenga la cantidad de agua suficiente para alimentar todo el sistema y garantizar que las bombas nunca trabajen en vacío. De la misma forma, se busca que el nivel en el reservorio disminuya 1 *cm* cada vez que los tanques de trabajo incremente 5 *cm* el suyo.

Esto será posible mediante una relación utilizando el área obtenida en la ecuación 3 que ayudará a calcular las dimensiones para el tanque reservorio cumpliendo el requerimiento anteriormente mencionado, entonces:

$$A_{reservorio} = 5 \times A_{tanque} \quad (11)$$

$$A_{reservorio} = 5 \times Largo \times Ancho \quad (12)$$

$$A_{reservorio} = 5 \times 0,45[m] \times 0,1[m] \quad (13)$$

$$A_{reservorio} \approx 0,225[m^2] \quad (14)$$

El área resultante en la ecuación (14) servirá para calcular la altura mínima que debe tener el tanque reservorio, usando también el volumen los tanques de trabajo obtenido en la ecuación (6) y el volumen de las mangueras obtenido en la ecuación (10), por ende:

$$V_{reservorio} > V_{tanque} + V_{mangueras} \quad (15)$$

$$A_{reservorio} \times h_{reservorio} > V_{tanque} + V_{mangueras} \quad (16)$$

$$h_{reservorio} > \frac{V_{tanque} + V_{mangueras}}{A_{reservorio}} \quad (17)$$

$$h_{reservorio} > \frac{0,0315 + 0,0008[m^3]}{0,225[m^2]} \quad (18)$$

$$h_{reservorio} > 0,14[m] \quad (19)$$

Posteriormente, cumpliendo las consideraciones emitidas al inicio del apartado y utilizando un factor de seguridad respecto a la cantidad de agua, se establece un reservorio con una altura necesaria de 0.31 [m], consecuentemente se obtienen las medidas de largo y ancho que cumplen con el área resultante en la ecuación (14). quedando el diseño como se muestra en la figura 10.

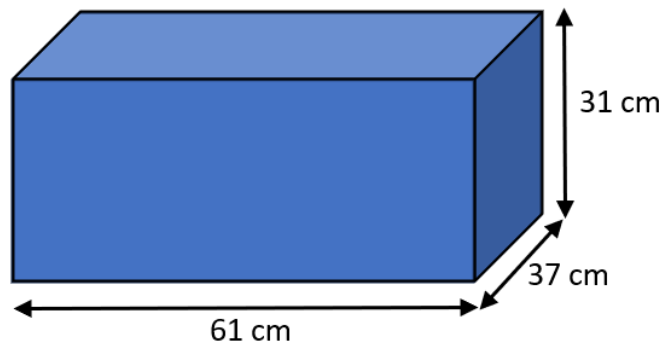


Figura 10. Dimensiones internas del tanque reservorio

Por último, una vez dimensionado el tanque reservorio, se procede a calcular el volumen dentro del mismo. Acotando que por seguridad no se debe llenar el nivel de agua hasta el máximo, por ende se realizará el cálculo utilizando aproximadamente 3/4 de la capacidad útil.

$$V_{reservorio} = Largo \times Ancho \times Alto \quad (20)$$

$$V_{reservorio} = 0,61[m] \times 0,37[m] \times 0,25[m] \quad (21)$$

$$V_{reservorio} = 0,056[m^3] \approx 14,8[Gal] \quad (22)$$

V-B2. Cálculo de desempeño mecánico: Una vez dimensionado los tanques se calculará la presión que el agua ejercerá dentro de los mismos con la finalidad de introducir esos resultados en un software de modelado 3D para realizar un análisis estático de las fuerzas ejercidas por el agua sobre las paredes del tanque y posteriormente comprobar la resistencia del material que se utilizará para la construcción.

Para los tanques de trabajo se aplica la fórmula de presión, obteniendo:

$$P = Densidad \times Gravedad \times Altura \quad (23)$$

$$P = 1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \times 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 0,7[m] \quad (24)$$

$$P = 6860[Pa] \quad (25)$$

Finalmente, se calcula la presión que existirá dentro del tanque reservorio, recordando que solo se usará aproximadamente 3/4 de su altura total, resultando:

$$P = Densidad \times Gravedad \times Altura \quad (26)$$

$$P = 1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \times 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 0,25[m] \quad (27)$$

$$P = 2450[Pa] \quad (28)$$

V-B3. Cálculo de potencias eléctricas: Para continuar cumpliendo con las consideraciones mencionadas al inicio de la sección, se debe diseñar un tablero de control que integre todos los componentes necesarios para el funcionamiento de la planta.

- 1 PLC, la unidad de control de toda la planta.
- 1 HMI, interfaz que permitirá el manejo de planta.
- 3 Sensores, ayudarán a monitorear el nivel de agua en los tanques.
- 2 bombas de agua DC, los actuadores que trabajarán en el proceso de llenado de los tanques.
- 1 Luz piloto, para mostrar cuando el proceso esté en funcionamiento
- 2 fuentes de alimentación, una será netamente para los equipos de control y la otra servirá para los elementos de fuerzas.

Para el cálculo de potencia de la planta, resulta la tabla I donde se muestra el consumo aproximado de energía.

Tabla I
CONSUMO ELÉCTRICO DE LA PLANTA

Elemento	Consumo eléctrico
PLC	1.5 A
HMI	0.5 A
sensores	0.06 A
Bombas DC	2.2 A
Luz piloto	0.02 A
TOTAL COMPONENTES	4.28 A

V-B4. *Selección de materiales y componentes:* En este apartado se buscará la mejor propuesta de material para la construcción de los tanques, el material de las tuberías utilizadas y los elementos eléctricos para alimentación y protección de todo el sistema eléctrico.

Inicialmente, se considera una comparación entre posibles soluciones de material implementado una matriz de ponderación de Norton para la decisión.

La matriz acoge los criterios de evaluación de cada material sobre columnas que contienen un valor de ponderación en porcentaje acorde a la importancia que representa cada uno de estos criterios respecto al proyecto, este valor se asigna de manera subjetiva dependiendo de la relevancia de los criterios para cada persona; además incluye una fila por cada material de construcción considerado. Posteriormente, este material es evaluado llenando el interior de la matriz con una calificación por cada criterio, donde 1 representa lo peor y 10 lo mejor. Finalmente, la puntuación del material en cada criterio es multiplicada por el factor de ponderación de cada uno de ellos y se suma para obtener la decisión del posible mejor material. Tal como se muestra en la figura 11.

Cabe mencionar que los valores de puntuación para cada criterio resultaron del análisis comparativo del material, los costes, propiedades mecánicas y tiempo de armado de diferentes proveedores residentes en el país, dejando por último la calificación subjetiva del acabado estético de los tanques.

	Costo	Resistencia	Disponibilidad de recursos	Tiempo de entrega	Estética	Rango
Ponderación	.35	.30	.15	.10	.10	1.0
Acrílico	5 1.75	4 1.2	8 1.2	7 0.7	8 0.8	5.7
Vidrio	8 2.8	1 .3	3 0.45	6 0.6	9 0.9	5
Fibra de vidrio	1 .35	8 2.4	7 1.05	5 0.5	8 0.8	5.1

Figura 11. Matriz de decisión por ponderación. Fuente: Autor.

Para la interpretación de la figura 11, se observa como el acrílico sobresale respecto a los demás materiales dejándolo como el indicado para la construcción de los tanques que conformarán la planta.

A continuación, se desarrollarán las pruebas mecánicas al material seleccionado. Para ello, se utilizará el software de modelado 3D Autodesk Inventor para analizar los esfuerzos que actúan sobre las paredes de la construcción y comprobar si es factible el uso del material escogido.

Entonces, hay que tener en cuenta lo que dice [18], pues el grosor del acrílico utilizado para construir una pecera se basa únicamente en la experiencia de la industria acuarística. A pesar de que el acrílico puede resistir gran parte de la presión ejercida por el agua, la elección se debe tomar considerando diversos factores estructurales. Sin embargo, generalmente se pueden considerar grosores de acrílico entre 6 a 10 mm para peceras que contienen un volumen no superior a 15 Galones de agua.

Sin más, utilizando la presión obtenida en la ecuación 25 se comprobará la resistencia del material estableciendo un grosor de 5 mm para los tanques de trabajo. En la figura 12 se muestra el modelo realizado dentro del software de Autodesk Inventor, considerando los agujeros internos que permitirán el flujo de agua entre los tanques y los agujeros correspondientes en los que se posicionarán los sensores y las válvulas de salida.

Cabe mencionar, que el diámetro de los agujeros internos se ha seleccionado de acuerdo a pruebas realizadas donde se demostró que $1/4$ in es el diámetro máximo que permite que el nivel de agua se eleve lo suficiente para tener un rango amplio de trabajo.

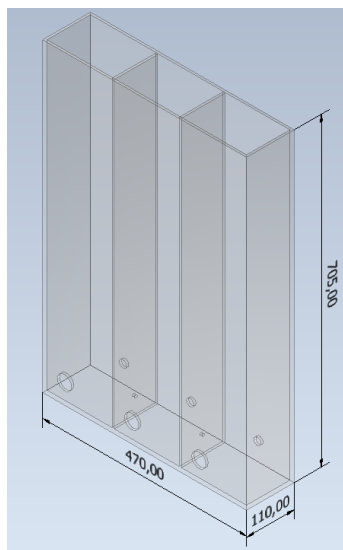


Figura 12. Modelado de los tanques de trabajo. Fuente: Autor.

Posteriormente, con la presión resultante en la ecuación 28 se comprobará la resistencia del acrílico, pero esta vez estableciendo un grosor de 6 mm para la construcción, por la mayor cantidad de agua que contendrá el tanque, considerando también los agujeros para la salida de agua hacia las bombas y la entrada de agua proveniente de los tanques de trabajo. El resultado del modelo se muestra en la figura 13

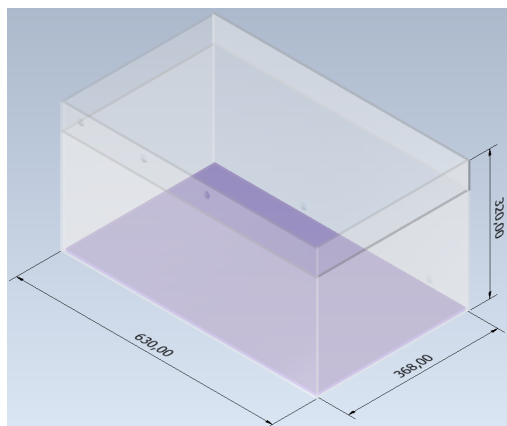


Figura 13. Modelado del Tanque reservorio. Fuente: Autor.

Una vez que se obtiene el modelado 3D en el software de Autodesk Inventor, se procede a aplicarle un material con características específicas que permitan analizar los esfuerzos actuantes sobre las paredes de cada tanque.

Primero, para cada una de las piezas que conforman los ensambles se elige el material de resina termoplástica como se muestra en la figura 14, puesto que aquel material es la representación del acrílico dentro del software.



Figura 14. Características físicas y mecánicas del acrílico. Fuente: Autor.

Seguidamente, como se muestra en la figura 15, se ingresa al entorno que proporciona el software para analizar tensiones. Dentro del entorno se crea un estudio, el icono se visualiza en la figura 16, se prepara el ensamble para ser analizado, fijando la base del mismo utilizando la función mostrada en la figura 17, luego la presión calculada correspondiente a cada tanque, se la coloca sobre las paredes en las que actúa esta presión, en la figura 18 se observa un ejemplo. Finalmente se oprime el botón de simulación mostrado en la figura 19 y con ellos se obtienen los resultados pertinentes que ayudarán a determinar la confiabilidad del material propuesta en la construcción.

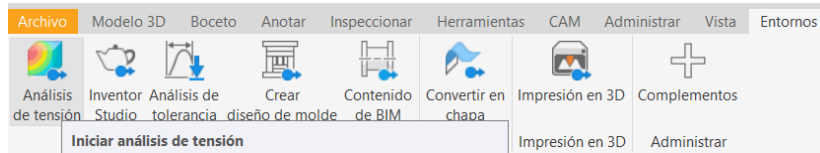


Figura 15. Icono del entorno de análisis de tensión. Fuente: Autor.

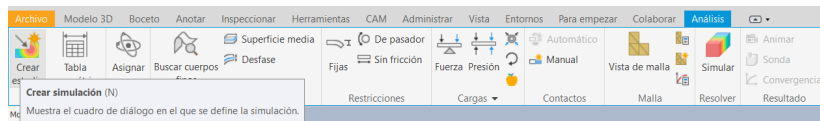


Figura 16. Iconos para crear estudios. Fuente: Autor.

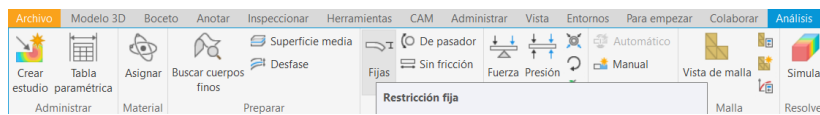


Figura 17. Función de restricción de caras. Fuente: Autor.

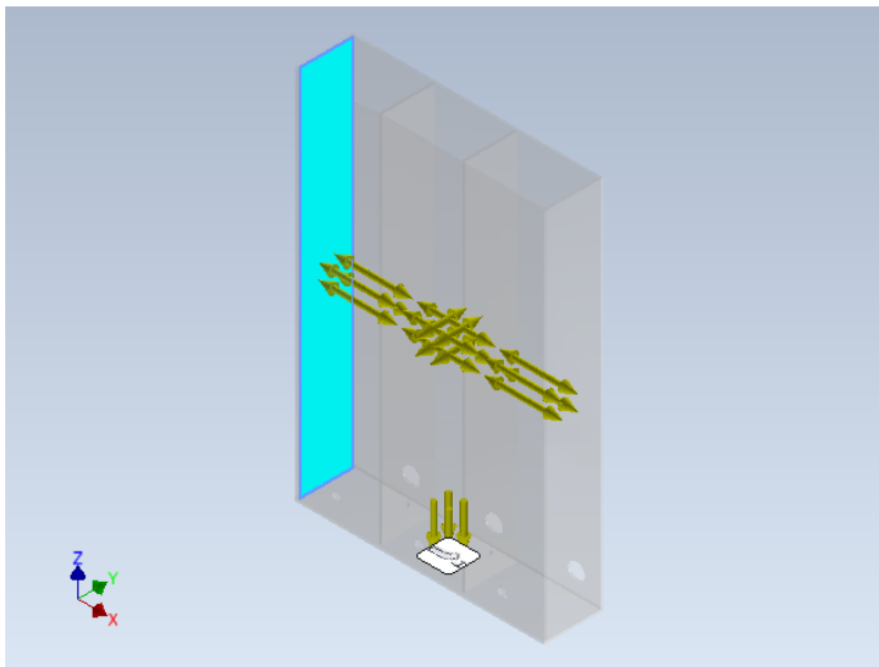


Figura 18. Aplicación de presión sobre las caras del ensamble. Fuente: Autor.

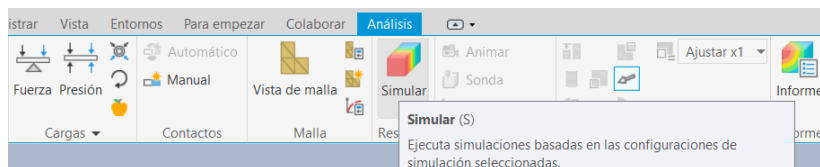


Figura 19. Icono para realizar la simulación del ensamble. Fuente: Autor.

■ **Tanques de trabajo**

Entre los resultados destacados se encuentra la tabla de la figura 20 donde se muestran las propiedades del material escogido; en el presente caso se ha utilizado la representación del acrílico.

Luego, se muestra el resultado de las tensiones de Von Mises en la figura 21. Este valor es importante para el análisis estructural, pues denota donde un material dúctil comienza a ceder cuando dicho valor iguala al límite de elasticidad del material definido. Por lo tanto, contrastando con las propiedades mecánicas del acrílico se define la resistencia del mismo en la presente aplicación.

Asimismo, como se visualiza en la figura 22 se obtiene un coeficiente de seguridad de 15 unidades, significando que el material alcanza el máximo nivel de resistencia ante la presencia de la carga aplicada.

Finalmente, en la figura 23 se muestra el desplazamiento o pandeo que podría presentar el material a la hora de aplicarle la carga especificada.

Nombre	Resina termoplástica	
General	Densidad de masa	1,28 g/cm ³
	Límite de elasticidad	57,2 MPa
	Resistencia máxima a tracción	114 MPa
Tensión	Módulo de Young	3,3 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,36 su
	Módulo cortante	1,21324 GPa
Nombre(s) de pieza	base.ipt lamina lateral.ipt plancha trasera.ipt planchas frontales.ipt lamina lateral.ipt lamina central.ipt lamina central.ipt	

Figura 20. Propiedades de la resina termoplástica (acrílico) y materiales del ensamble.

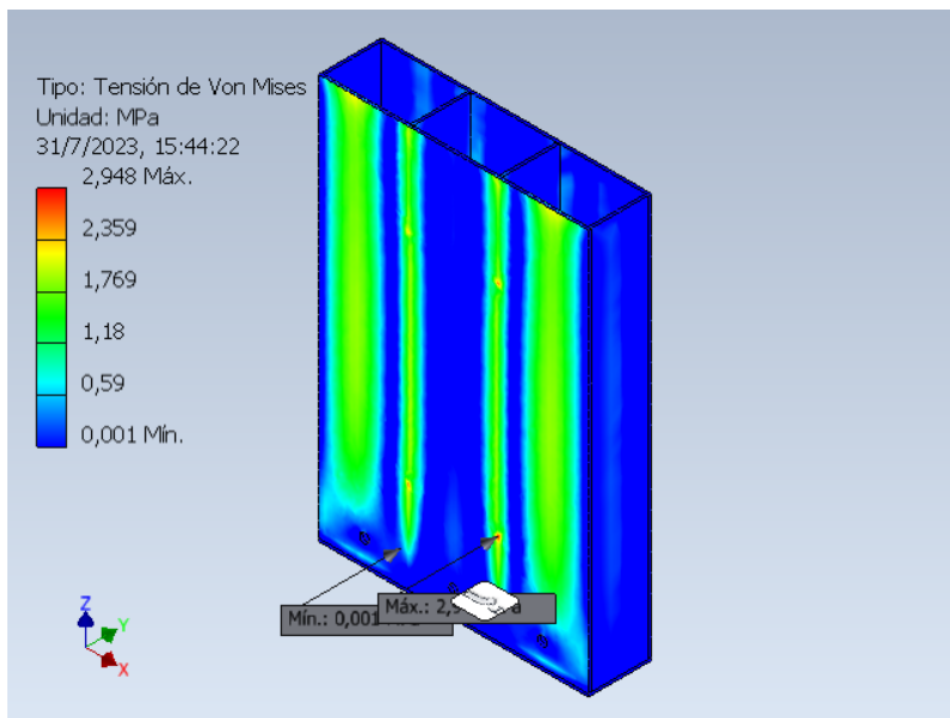


Figura 21. Tensiones de Von Mises

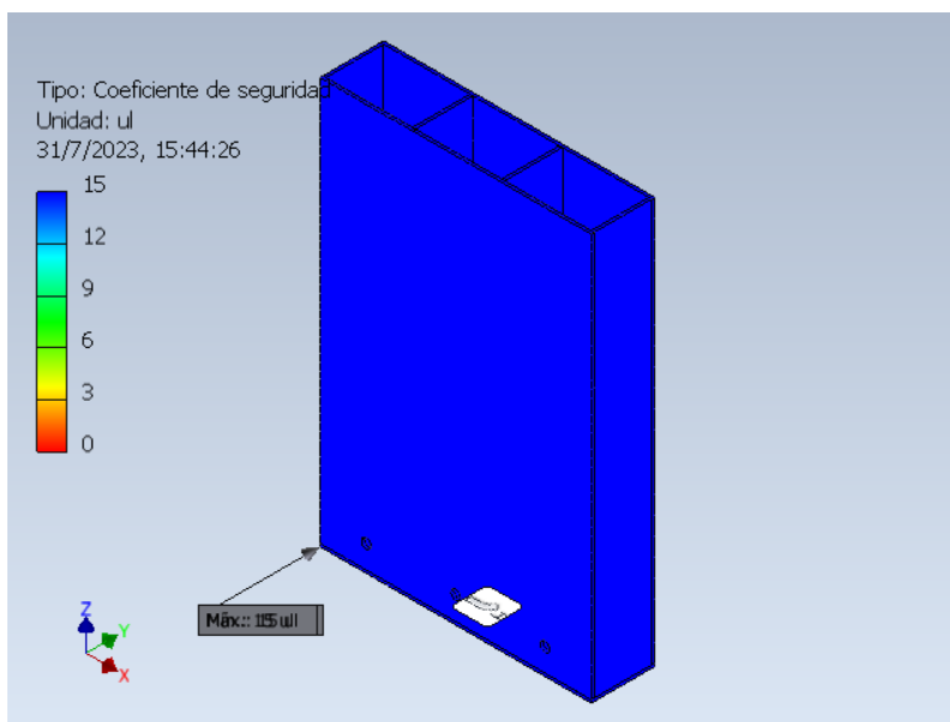


Figura 22. Coeficiente de seguridad del material respecto a la construcción

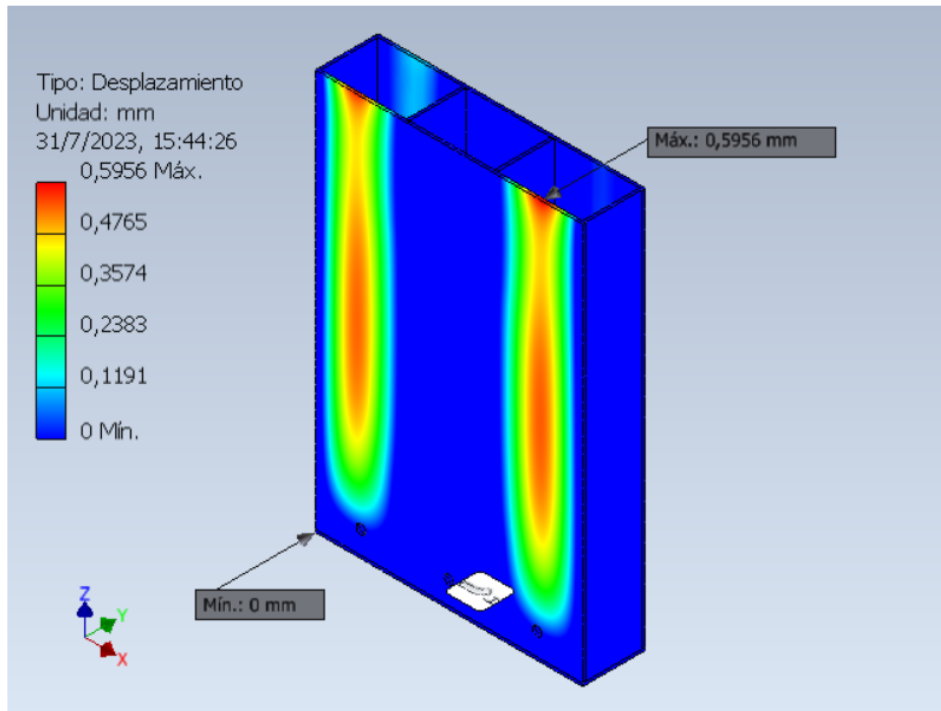


Figura 23. Desplazamiento general, representación de pandeo

■ Tanque reservorio

En la figura 24, se muestran los elementos que conforman el ensamble del tanque reservorio y las propiedades físicas y mecánicas del acrílico.

De la misma forma, se visualiza la tensión de Von Mises con un valor máximo de 3.2 MPa en la figura 25, mientras que haciendo la comparativa con el límite de elasticidad del acrílico es evidente como el material soportará la carga de la presión ejercida por el agua.

Consecuentemente, como se muestra en la figura 26, es de esperar como el coeficiente de seguridad alcanza el máximo valor por motivos de que la tensión de Von Mises se encuentra lejos de la resistencia a la tracción.

finalmente, el desplazamiento mostrado en la figura 27 muestra un máximo de 3.4 mm, siendo un resultado atractivo para continuar con el análisis.

Nombre	Resina termoplástica	
General	Densidad de masa	1,28 g/cm ³
	Límite de elasticidad	57,2 MPa
	Resistencia máxima a tracción	114 MPa
Tensión	Módulo de Young	3,3 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,36 su
	Módulo cortante	1,21324 GPa
Nombre(s) de pieza	Base.ipt lateral25.ipt lateral360_2.ipt tapas laterales_2.ipt tapas laterales_2.ipt lateral360_3.ipt	

Figura 24. Propiedades de la resina termoplástica (acrílico) y materiales del ensamble.

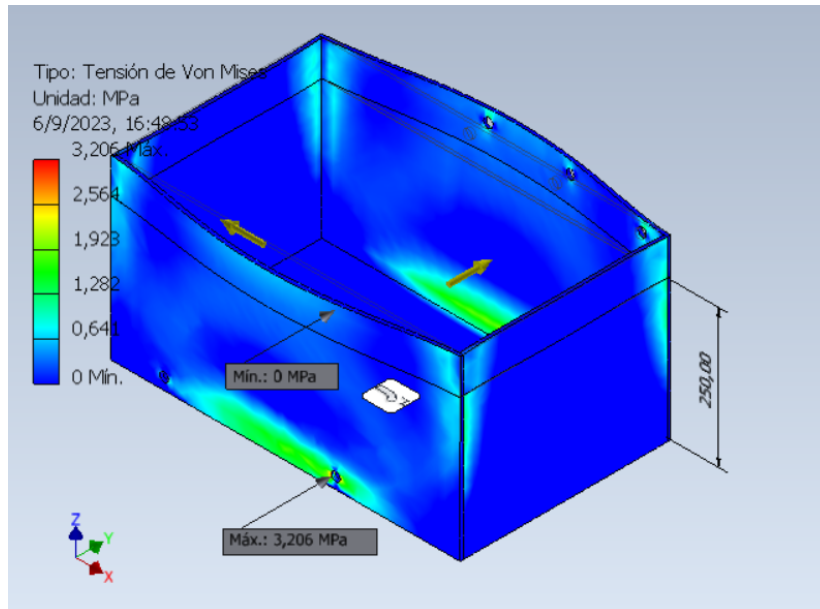


Figura 25. Tensiones de Von Mises.

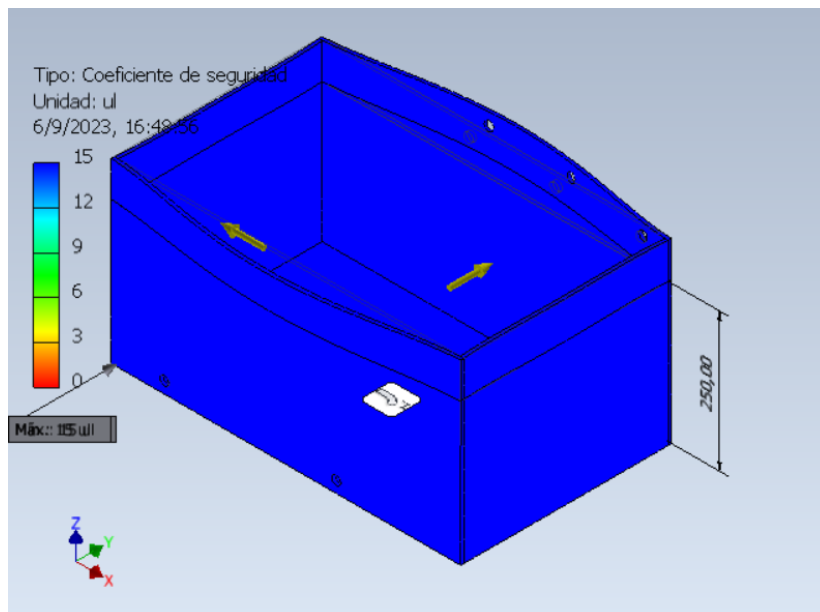


Figura 26. Coeficiente de seguridad del material respecto a la construcción

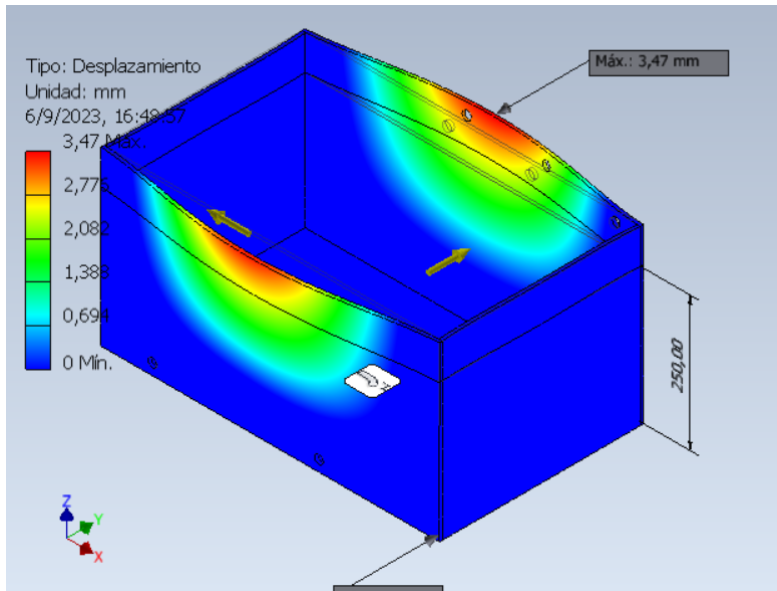


Figura 27. Desplazamiento general, representación de pandeo

En conclusión, para el diseño de los dos tanques se alcanzaron resultados positivos respecto a la resistencia del material, obteniendo coeficientes de seguridad muy altos. Los valores de desplazamiento muestran ser favorables estando en el orden de los pocos milímetros; por lo que, la utilización del acrílico forma parte de una selección viable.

Por otro lado, se analizan las opciones de material para la tubería que conectará el tanque reservorio con los tanques de trabajo a través de las bombas DC. Debe ser flexible para permitir una mayor movilidad en la planta durante el mantenimiento, además de ser resistente al desgaste. También, a pesar de que los actuadores hidráulicos no proporcionan una gran potencia, es importante que la tubería sea resistente a la presión y que tenga una apariencia estética agradable.

Para este caso, una opción favorable sería la utilización de manguera hidráulica negra de una capa, capaz de soportar hasta 80 Psi de presión y como se mencionó en el cálculo de dimensiones, la manguera deberá tener un diámetro interior de 3/8 in.

En cuanto al tablero eléctrico, se elige uno de material normalizado, acero de 1.5 mm de grosor, donde las dimensiones dependerán de los elementos que contendrá el mismo.

Con los cálculos realizados en la tabla I, se determinarán los elementos necesarios para controlar la planta y las debidas protecciones.

El consumo eléctrico general es de aproximadamente 4.28 A, para lo cual se determina dividir los sistemas con dos fuentes de alimentación para evitar alteraciones entre los equipos de control y las bombas de agua que representan la etapa de potencia.

Primero, una fuente independiente alimentará los equipos sensibles como el PLC y el HMI, esta fuente tiene un consumo directo de 2.2 A. Siguiendo con la fuente que alimenta los botones, bombas y sensores, que tiene un consumo directo de 2 A.

Por consiguiente, considerando las fuentes de alimentación y el consumo general de la planta, se utilizará un disyuntor de dos polos de 16 A que protegerá todo el sistema eléctrico.

Para los sensores, se determinó reutilizar el sensor que brindó la tesis sobre la cual se está trabajando, además, de adquirir dos sensores del mismo modelo para evitar diferencia de escalados. También, para mayor facilidad a la hora de usar los sensores se diseñó un circuito impreso, mostrado en la figura 28, que convertirá la señal de corriente eléctrica que los sensores generen, en señales de voltaje. El esquema eléctrico se muestra en la figura 29. Además, cabe mencionar que el PLC cuenta con dos entradas de señales analógicas, por lo que se ha dispuesto integrar un multiplexor para las señales de voltaje por medio del uso de un relé.

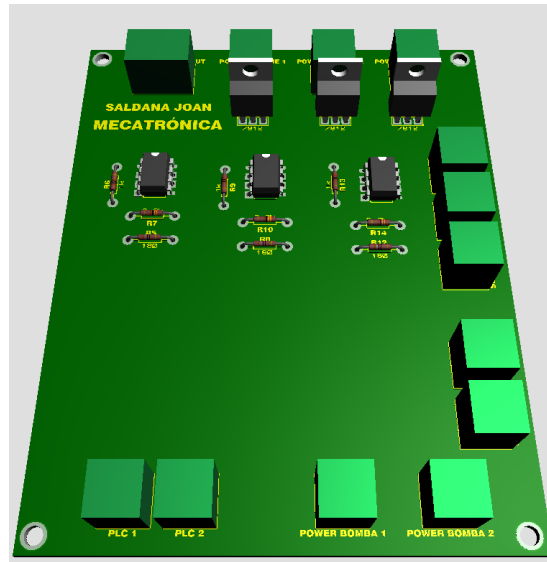


Figura 28. Diseño del circuito impreso

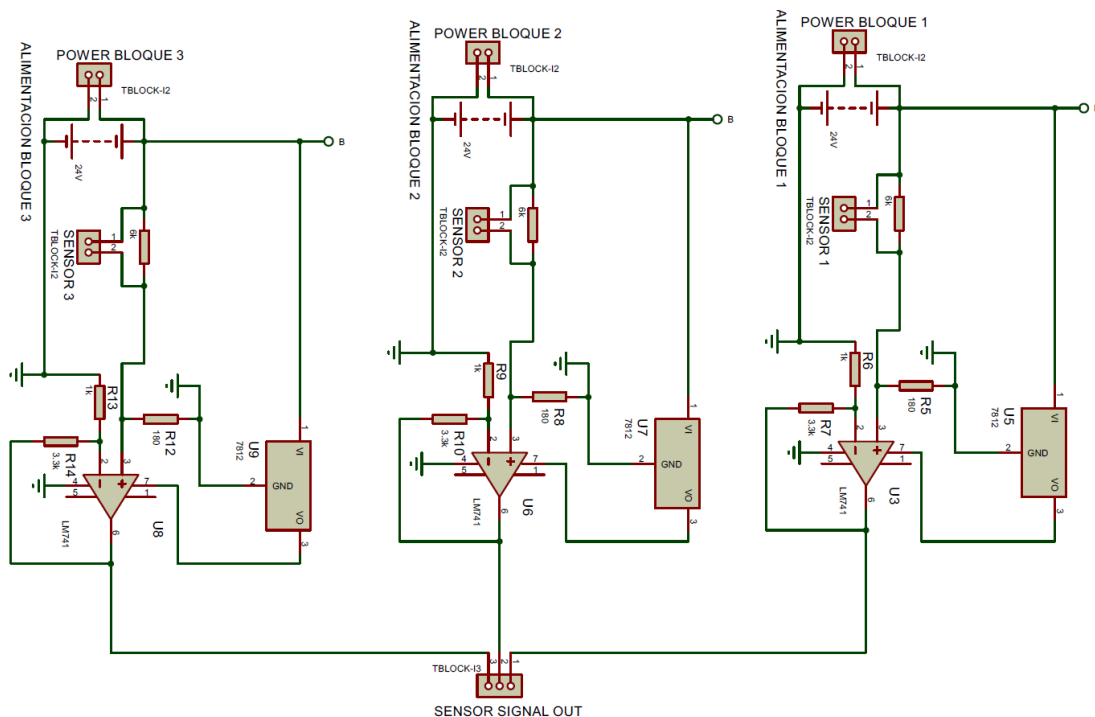


Figura 29. Diagrama electrónico para el uso de sensores

Siguiendo con el control de las bombas DC, por motivos de consumo se ha determinado usar dos relés, uno para cada bomba, donde la activación del relé será comandado por la salida del PLC, cuyo diagrama eléctrico se muestra en la figura 30.

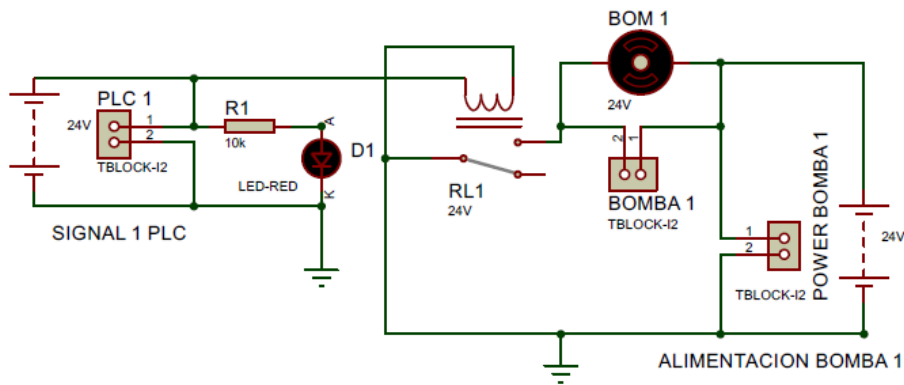


Figura 30. Diagrama electrónico para el uso de bombas

Adicionalmente, los tanques de trabajo cuentan con un largo de 47 *cm* y el tablero eléctrico disponible cuenta con un largo de 30 *cm*, pero la mesa de trabajo cuenta con un largo de 70 *cm*, por lo que se decidió dejar 3,5*cm* a cada lado de los elementos para conservar la simetría de la planta.

Luego, para describir todos los componentes que serán utilizados en la planta, las dimensiones y especificaciones, se genera el modelo del tablero mostrado en la figura 31, y la figura 32 que muestra la ubicación de los componentes ocupando los espacios lo más eficientemente posible.

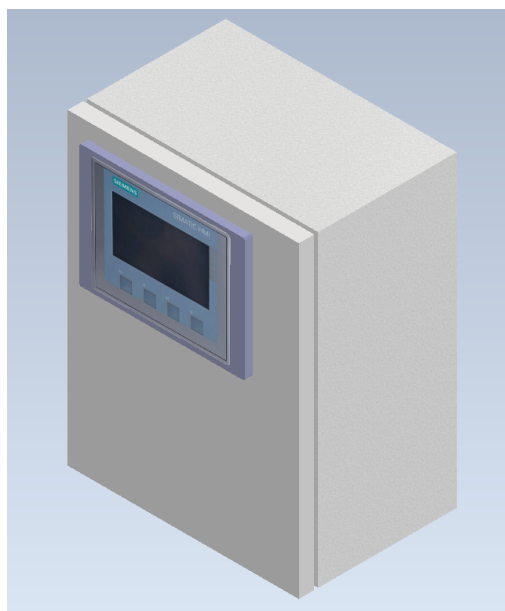


Figura 31. Vista exterior del tablero eléctrico

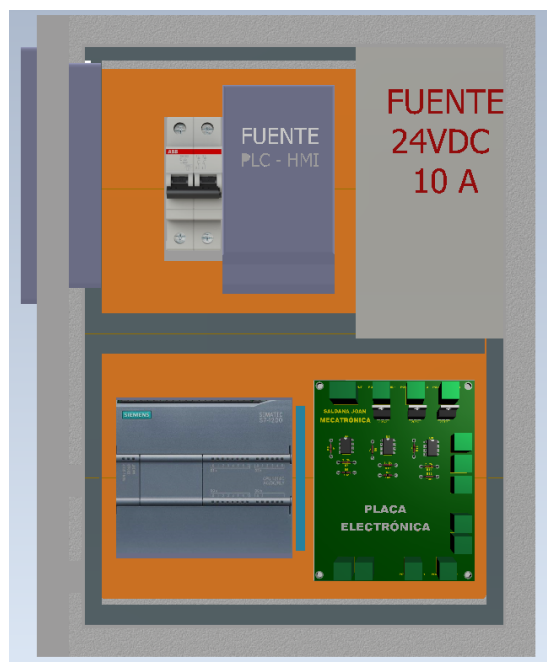


Figura 32. Vista interna de tablero eléctrico

Para concluir con el apartado de diseño, se menciona que las conexiones entre los equipos de control y fuerzas quedan identificados en el apéndice B publicado en los anexos.

V-C. Construcción de la planta

A continuación de la selección de todos los elementos y materiales para el funcionamiento de la planta, se procede a la construcción siguiendo los esquemas que se obtuvieron al realizar los cálculos, modelados y simulaciones.

V-C1. Etapa Hidráulica: Para la construcción de los tanques, una vez diseñado y seleccionado el material, se realizaron los cortes de las piezas mediante una máquina láser para obtener el mejor acabado posible en las uniones. A continuación, las piezas se alinearon meticulosamente y, utilizando pegamento acrílico, que demostró ser una elección eficaz al proporcionar una unión fuerte, se ensamblaron los tanques siguiendo los planos de medidas. El proceso de ensamblaje continuó con la cuidadosa aplicación de pegamento epóxico para reforzar las aristas y se finalizó con la aplicación de silicona transparente para hermetizar los tanques.

El diseño de los tanques también consideraba la ubicación de los agujeros para instalar acoples que interconectarían los tanques a través de los segmentos de manguera. Por lo tanto, se utilizaron acoples de bronce de $3/8$ in en la salida del tanque reservorio hasta las bombas. Asimismo, para unir las mangueras desde las salidas de las bombas hasta las entradas de los tanques de trabajo, se emplearon uniones de bronce a 90 grados, cubriendo las mangueras con canaletas a lo largo del recorrido para mejorar la apariencia visual. Finalmente, desde las salidas de los tanques de trabajo hasta la entrada del tanque reservorio se utilizaron válvulas de bola de bronce de $3/8$ in y acoples de bronce de $3/8$ in para conectar las mangueras.

Para ahorrar espacio, se colocaron las bombas de forma horizontal en la parte trasera de la planta. Además, se añadieron dos platinas a la mesa de trabajo para sujetar las bombas de forma segura mediante pernos y garantizar una sujeción adecuada.

V-C2. Etapa eléctrica-electrónica: Comenzando desde el conector de entrada de 110 VAC para el gabinete eléctrico, las líneas llegan hasta un disyuntor de 16 A que protegerá todo el sistema en caso de sobrecargas

o cortocircuitos. Luego, este disyuntor alimentará las dos fuentes de voltaje continuo; una de ellas servirá para alimentar el PLC y el HMI, mientras que la segunda fuente suministrará energía a los elementos de acción, como botones, bombas y la placa electrónica.

Cabe destacar el diseño de la placa electrónica, que funciona como un conector común para todos los negativos del sistema eléctrico de la planta. Por lo tanto, cumple la función de interconectar las dos fuentes de voltaje. Además, esta placa conecta sus entradas y salidas con el PLC y, finalizando con el enlace a una bornera donde llegan las señales de los sensores y las conexiones de las bombas.

Por otro lado, los sensores se han dispuesto en la parte baja de los tanques de trabajo. Se necesitó un acople para tanques del mismo diámetro donde quedaron colocados con pegamento epóxico para evitar fugas de agua. Estos se conectarán a una bornera dentro del tablero eléctrico en donde su señal se unirá con la placa electrónica y posteriormente llegarán a las entradas analógicas del PLC.

Finalizando, las bombas serán controladas por relés automotrices de 24 V, debido a consideraciones de costos y disponibilidad. Estos relés se activarán a través de las salidas del PLC, permitiendo el flujo de una señal negativa que pondrá en marcha las bombas.

V-D. Automatización y control

Una vez se tiene la construcción de la la planta y las conexiones eléctrica se procede con la configuración de los equipos a utilizar.

V-D1. Configuración de sensores: Para configurar la señal que entregan los sensores al PLC, se adaptó el circuito impreso que se muestra en la figura 28, donde se observa la integración de un convertidor de señales mediante un amplificador operacional (OPAMP).

El diagrama utilizado se presenta en la figura 33, y se describe como la utilización de un OPAMP LM741 en configuración no inversora para adquirir la señal de corriente en mA proveniente de los sensores y transformarla a una señal de voltaje con una ganancia de 4.3 unidades, después de pasar por una resistencia de 180 Ω. La ganancia se logra mediante dos resistencias en la entrada inversora del OPAMP, una con un valor de 3.3 KΩ y la otra de 1 KΩ. El mismo circuito se aplica a cada sensores, realizando las conexiones anteriormente mencionadas.

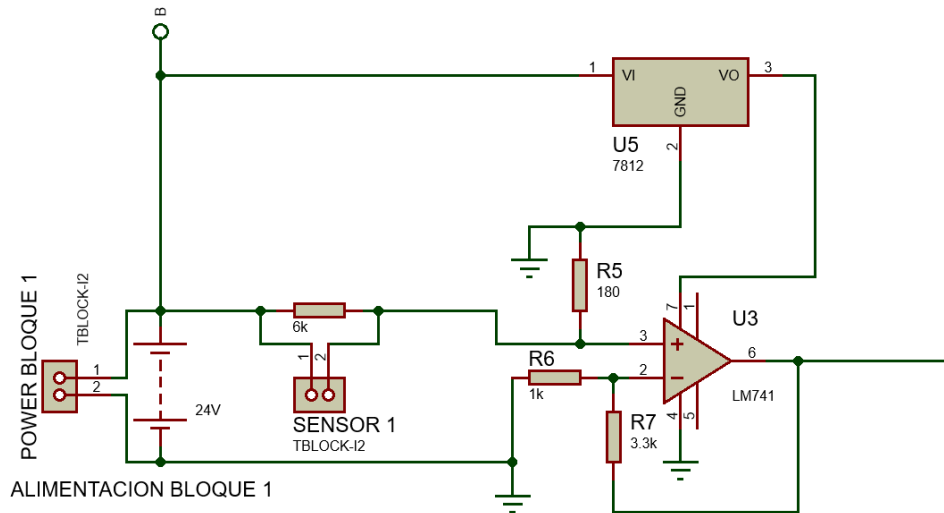


Figura 33. Esquema electrónico del convertidor de señal de corriente a voltaje

Luego de transformar la señal del sensor, en primer lugar cabe resaltar como se conectan al PLC, la señal del sensor 1 ingresa directamente a la entrada analógica IA0 del PLC, mientras que la señal de los otros dos sensores primero deben pasar por un relé que ayudará a realizar un multiplexor para poder ingresar dos señales

diferentes en un mismo puerto de entrada en el PLC, aclarando que ocurre con una diferencia de tiempo de 500 ms.

En la figura 34 se muestra como el PLC adquiere la información que ingresa por sus entradas analógicas, esta información ingresa digitalizada y con el bloque de normalización se transforma a valores reales. Luego, la información pasa por un bloque de escalado que se debe ajustar a los límites establecidos por la planta y finalmente, se integra un bloque para calibrar los valores medidos.

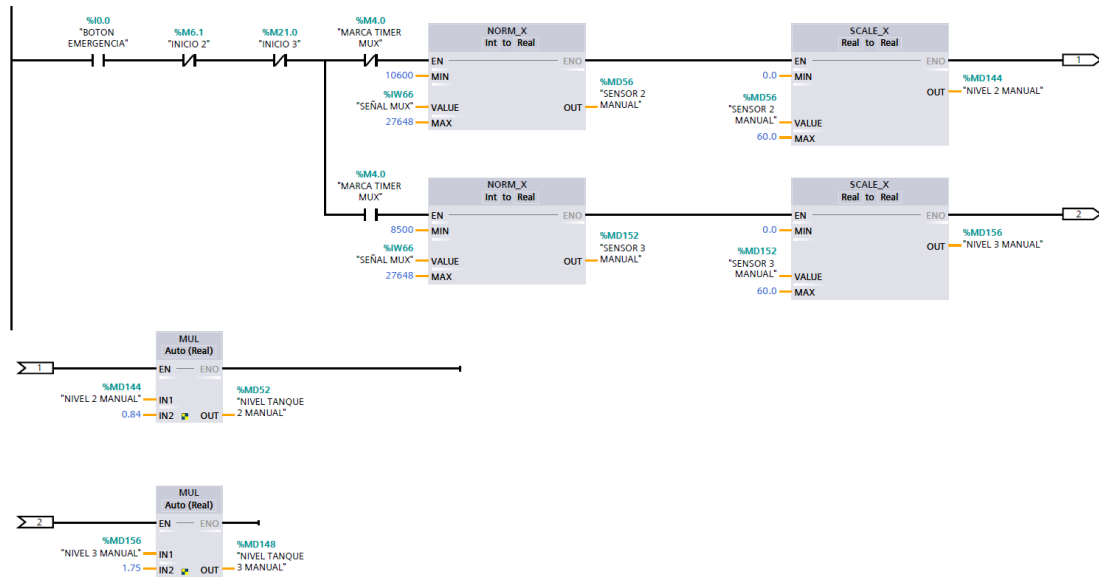


Figura 34. Bloques para capturar señales de entradas en PLC

Por otra parte, en la figura 35 se muestran los bloques de programa para activar la bobina del relé utilizado en la multiplexación de la señal de entrada hacia el pin IA1 del PLC.

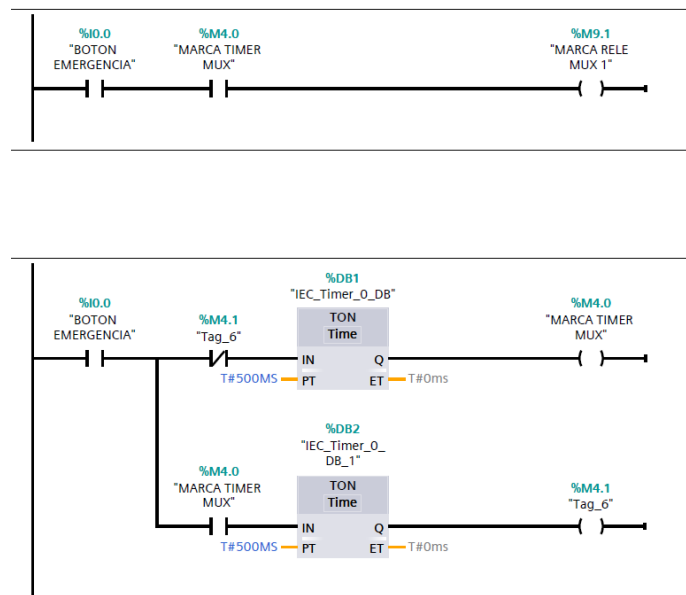


Figura 35. Bloques para multiplexar señal analógica

V-D2. Programación HMI: La pantalla HMI contendrá 3 imágenes de visualización que se adaptará acorde al tipo de control sobre el cual se estará trabajando.

Primero, en la figura 36 se encuentra la imagen mostrada para el control manual de la planta, este se activa dejando el selector dispuesto en el tablero eléctrico en la posición central, en ella se puede visualizar el nivel de cada tanque a través de las tres gráficas que representan a los mismos y los cuales se encuentran identificados. Además, se sitúan los botones con los cuales se pueden activar y desactivar las bombas para comprobar su funcionamiento o llevar a los tanques a cualquier nivel deseado sin necesidad de realizar un control.

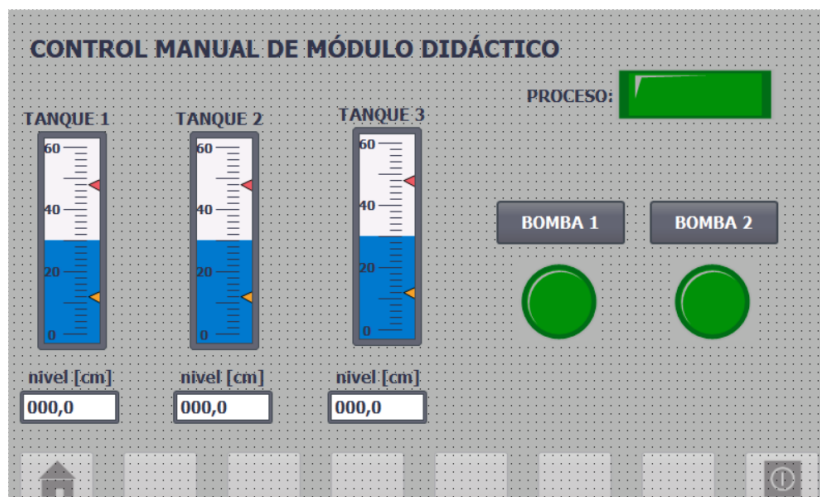


Figura 36. Pantalla HMI de control manual

La segunda pantalla se activa al posicionar el selector del tablero eléctrico hacia la izquierda. En esta pantalla, se encuentra la interfaz para el control por histéresis, mostrado en la figura 37, que es gestionado por el software de LabVIEW a través del PLC. En este caso, el PLC servirá como una tarjeta de adquisición de datos y responderá a las acciones realizadas por la programación en LabVIEW.

La pantalla en el HMI servirá únicamente para la visualización, ya que LabVIEW también cuenta con su propia interfaz gráfica, donde se llevarán a cabo las acciones de control. Más adelante, se mostrará dicha interfaz.

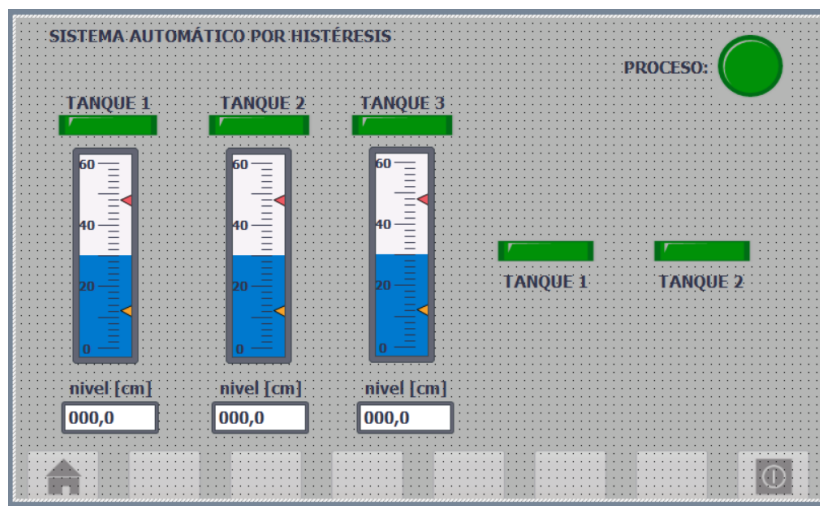


Figura 37. Pantalla HMI de control por histéresis desde LabVIEW

Para la tercera pantalla, se encuentra la interfaz del control PID como se muestra en la figura 38, en ella se puede visualizar el nivel del tanque a controlar, así como del botón que permite la activación y desactivación del control en dicho tanque.

Además, cuenta con un visor donde se mostrará la acción de control para las bombas. Dicha acción de control estará en porcentaje por ser un control de nivel y actuará directamente sobre las bomba en forma de señal PWM.

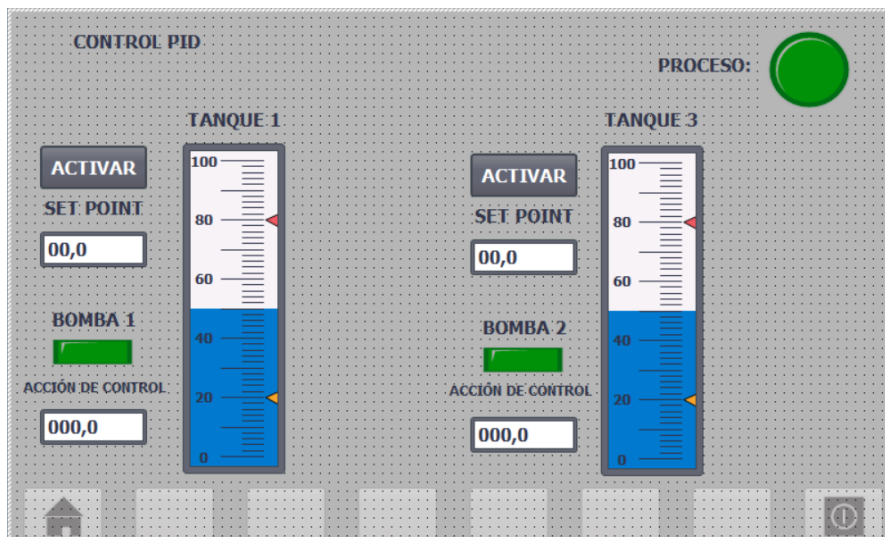


Figura 38. Pantalla HMI de control PID

V-D3. *Programación PLC:* Como primer punto, se describirá el control manual programado en el PLC, el cual no solo sirve para comprobar el funcionamiento de la planta, sino que también resulta ser un modo útil para su gestión.

Comenzando con la figura 39, en la cual se muestran los bloques utilizados para asignar una marca a cada pantalla del HMI. Estas marcas se utilizarán más adelante para activar o desactivar la programación.

A continuación, se presenta el bloque de programa donde se inicia el control manual, el cual se muestra en la figura 40. En esta figura, se observa cómo el control manual depende tanto de las marcas en las pantallas del HMI como de las señales provenientes del selector. Mientras este último se mantenga seleccionado en la posición intermedia, la activación del control manual será posible.

Siguiendo por el bloque que activa las bombas por medio de las marcas comandadas por el HMI. El bloque se muestra en la figura 41.

Finalizando con los bloques mostrados en la figura 34, en la figura 35 y la figura 42 que programan la adquisición de las señales de los sensores, el multiplexor y la salida de las bobinas para el relé de multiplexación.

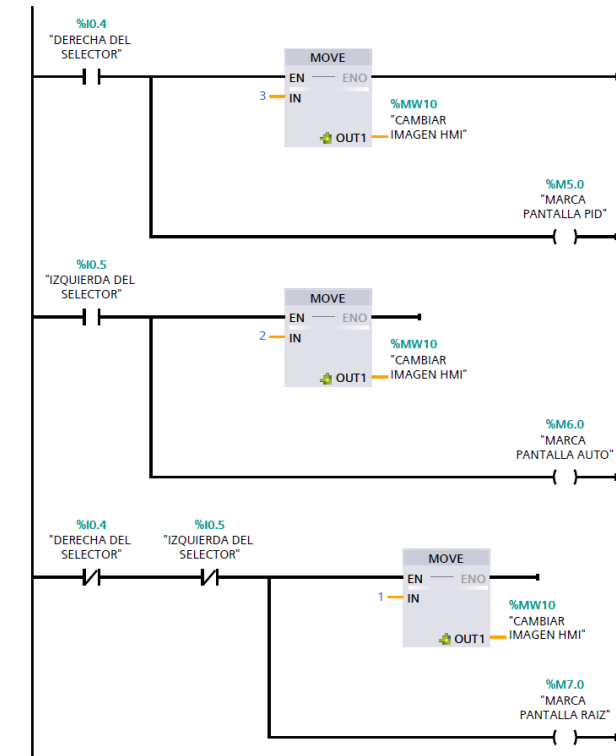


Figura 39. Definición de marcas para cada pantalla del HMI

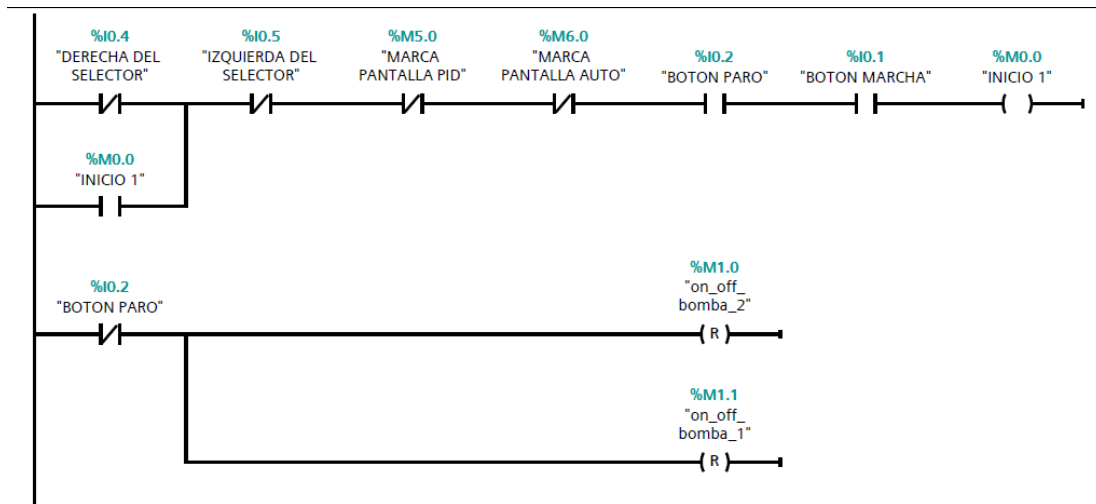


Figura 40. Bloque de inicialización del control manual

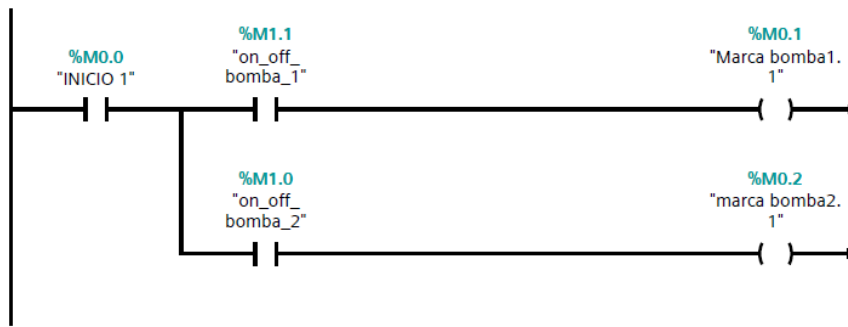


Figura 41. Bloque de activación para bombas

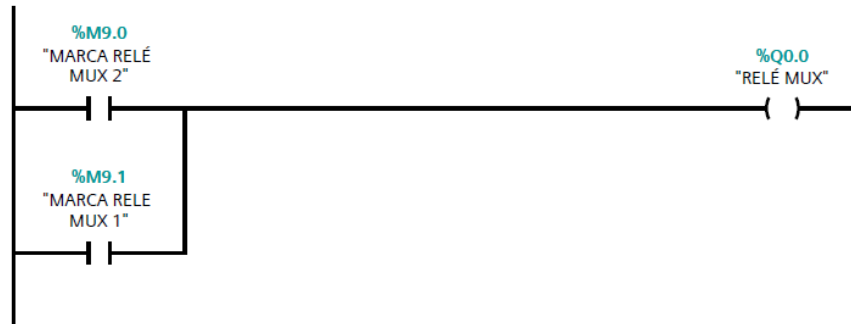


Figura 42. Bloque de salida para activación del multiplexor

Ahora, se desarrollará la programación para el control PID, mostrando los bloques necesarios y parámetros para la función PID_Compact que permite al PLC manipular el caudal de las bombas por medio de la salida PWM y así se realice el control del nivel en el tanque requerido.

Para empezar, se crea un Cycle Interrupt con un ciclo de trabajo inferior al main principal, como se muestra en la figura 43. Dentro de él se colocan las señales que activarán el bloque PID_Compact, el cual su funcionamiento se lo detalla en el apéndice C de los anexos.

Por otro lado también se definen las marcas que controlan el set point en cada uno de los controladores. Dicho esto, en la figura 44 se presenta el bloque de programación para el PID_Compact del tanque 1 y en la figura 45 se presenta el bloque de programación para el PID_Compact del tanque 3.

Después, el control secuencial comienza con la adquisición de datos por parte de los sensores, ingresando a los bloques de control PID_Compact, a través de una marca independiente para cada controlador. Del mismo modo, la marca que permite ajustar el nivel de referencia se dirige a los bloques de control desde el HMI.

Una vez configurados los parámetros internos del controlador, este puede obtener información suficiente de los sensores para ayudar en la identificación del comportamiento de la planta.

Finalmente, se inicia de forma manual el PID_Compact para obtener las primeras lecturas. Con estas lecturas, se realiza una optimización inicial para que el controlador se familiarice con el comportamiento de la planta. Luego, se lleva a cabo una optimización más precisa para que el controlador defina los parámetros más adecuados para el control de la planta.

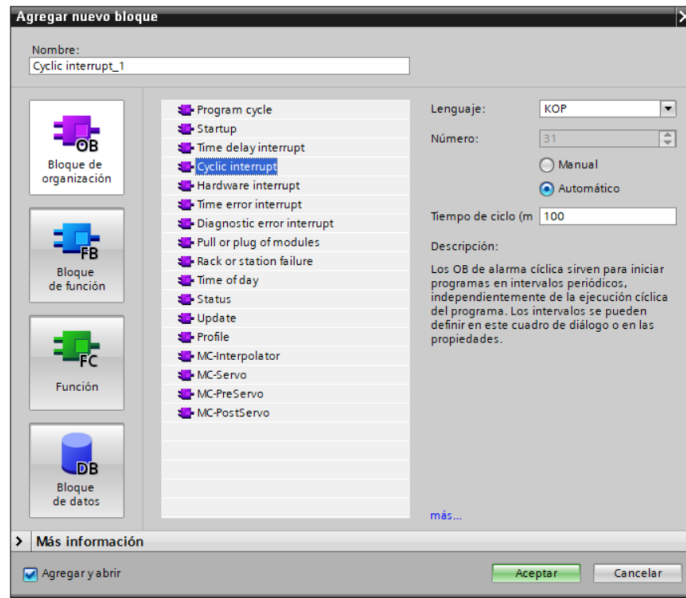


Figura 43. Bloque principal Cycle Interrupt

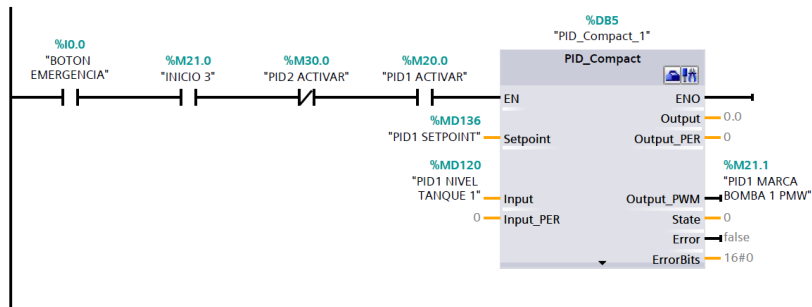


Figura 44. Función PID_Compact para control de tanque 1

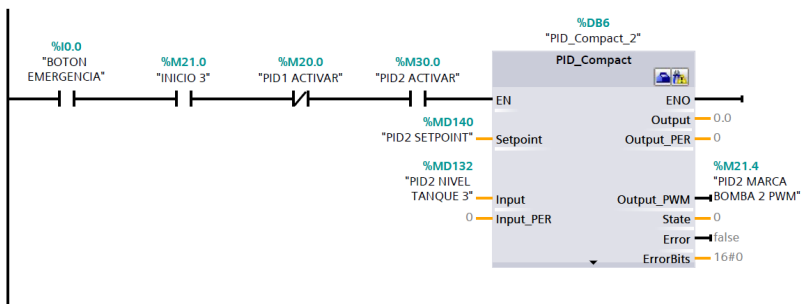


Figura 45. Función PID_Compact para control de tanque 3

V-D4. *Control por histéresis en LabVIEW*: La histéresis forma parte de las estrategias de control basadas en umbrales, que establecen un límite superior e inferior para mantener una variable dentro de los rangos deseados. Este tipo de control se utiliza en procesos donde no se requiere una sensibilidad excesiva ni una acción de control frecuente.

En LabVIEW, se diseñó un programa que depende de un punto de referencia conocido como “SETPOINT” y un valor “DELTA” que ayuda a establecer los límites superior e inferior, creando así la banda de histéresis. La figura 46 muestra la interfaz utilizada para lograr el control.

La interfaz incluye barras que muestran el nivel de los tres tanques, además de botones que permiten seleccionar el tanque que se desea controlar y las bombas que participarán en el proceso. También cuenta con indicadores que permiten ajustar los valores del punto de referencia y del delta.

Finalmente, la programación se realiza enlazando las variables del propio LabVIEW y las marcas que se encuentran en los segmentos de programación del PLC. En el apéndice E en los anexos se encontrarán los diagramas de programa utilizados.

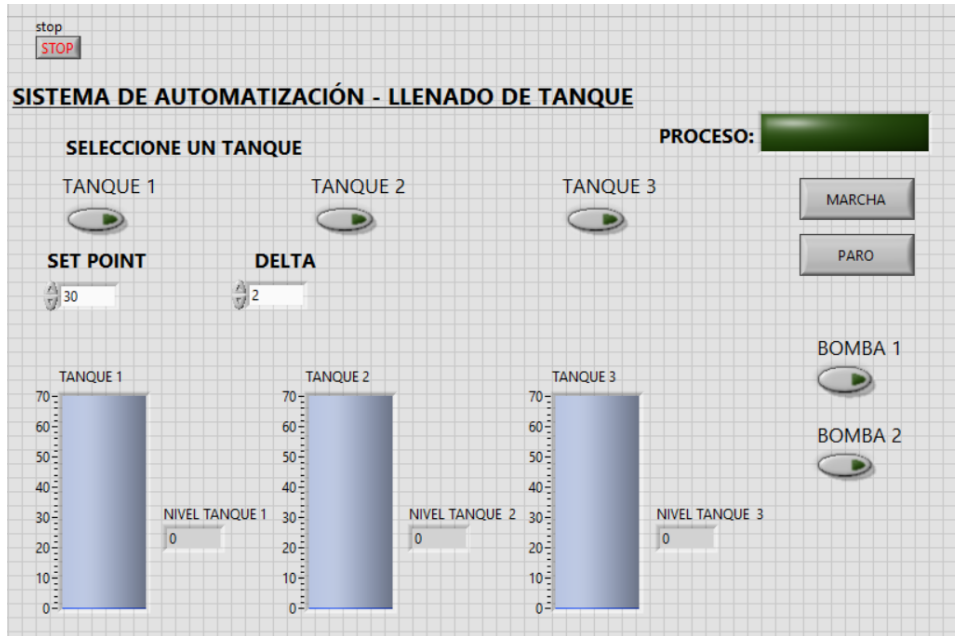


Figura 46. Interfaz gráfica en LabVIEW

VI. RESULTADOS

VI-A. Planta

En la figura 47 se muestra el acabado final de los tanques de trabajo vistos desde la parte frontal, en donde también se encuentran ubicadas las válvulas de bola que permiten crear perturbaciones al sistema. Por el mismo lado, pero en la parte inferior, como se muestra en la figura 48, se ubica el tanque de reserva, el cual recibe el agua proveniente de los tanques de trabajo para introducirla nuevamente al sistema.

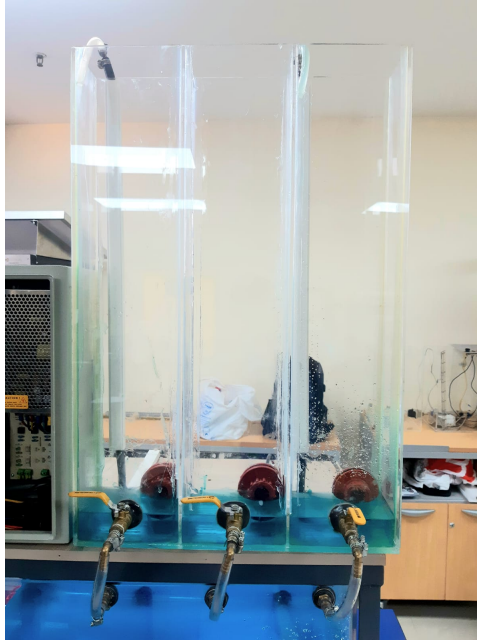


Figura 47. Vista frontal de los tanques de trabajo

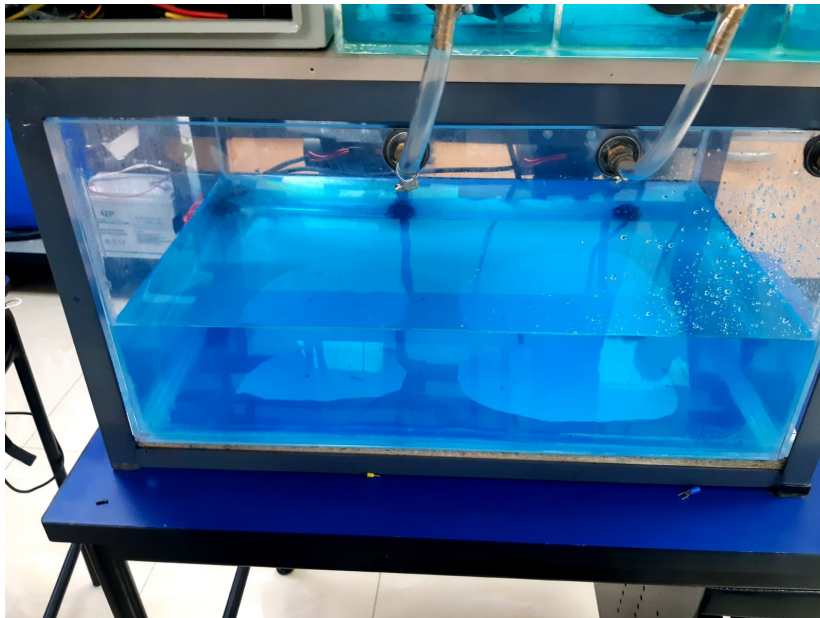


Figura 48. Tanque de reserva

Por la parte trasera de la planta, se ubican los sensores de presión hidrostáticos y parte de la tubería que conecta el tanque reservorio con los tanques de trabajo, tal como se muestra en la figura 49. Seguidamente, en la parte inferior se encuentra la continuación de las tuberías y su conexión con las bombas y el tanque de reserva, tal como se muestra en la figura 50, .



Figura 49. Vista posterior de los tanques de trabajo

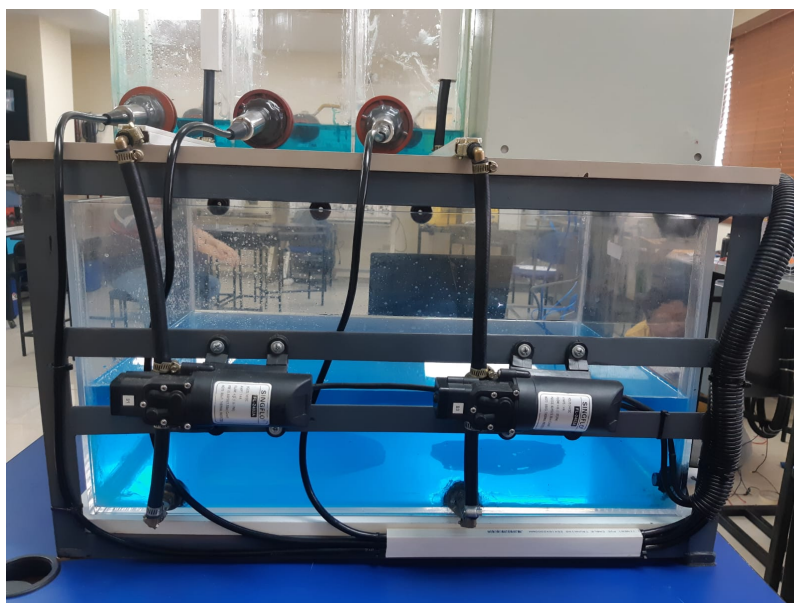


Figura 50. Ubicación de bombas

A continuación, en la figura 51, se muestra la ubicación de la válvula, que se encuentra a un costado de la planta. Esta válvula permite que el tanque reservorio desfogue la mayor cantidad de agua, lo que hace que la planta sea más ligera en caso de necesitar un traslado



Figura 51. Válvula de desfogue del reservorio

Luego, en la figura 52 y en la figura 53 se visualiza el acabado final del tablero eléctrico, la ubicación del HMI y todas las conexiones internas que permiten la interacción con la planta. Además, se muestra como quedó ubicada la placa electrónica, la cual permite la conversión de las señales provenientes de los sensores y el control de las bombas por medio de los relés.



Figura 52. Parte frontal del tablero eléctrico



Figura 53. Conexiones internas del tablero eléctrico

VI-B. LabVIEW

Por otro lado, se presenta el control por histéresis logrado a través del software de LabVIEW. En la figura 54 se muestra la interfaz gráfica del software trabajando en tiempo real, comunicandose con la planta por medio del PLC y manteniendo el nivel del tanque 1 en el punto de referencia, utilizando la bomba 1 y considerando el valor delta mostrado en la figura 55.

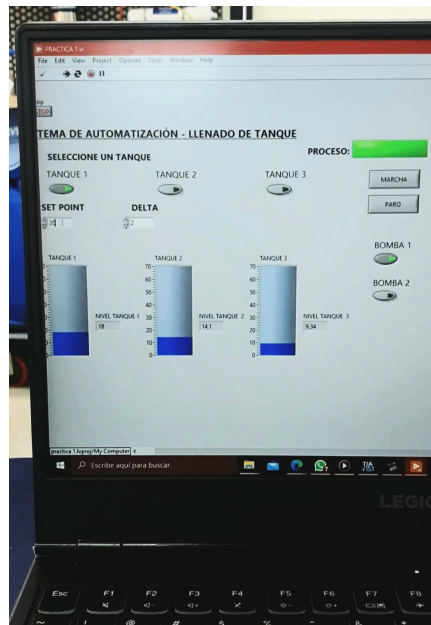


Figura 54. Interfaz gráfica del control por histéresis en LabVIEW



Figura 55. Valores de referencia

VI-C. Control PID

Se estableció un controlador PID a la planta, por medio del bloque de control PID_Compact, perteneciente a TIA Portal. En la figura 56 se muestra cómo el bloque de control trabaja en modo de optimización fina, el cual permite adquirir información del proceso llevado a cabo en la planta, y a través de la manipulación de la variable de salida del bloque, establece los mejores parámetros para controlar el proceso. En la figura 57 se muestran los parámetros obtenidos luego de la afinación del controlador.

Por último, en la figura 58 se muestra la gráfica del controlador actuando de forma autónoma y manteniendo el nivel del tanque 1 en el valor de referencia requerido.

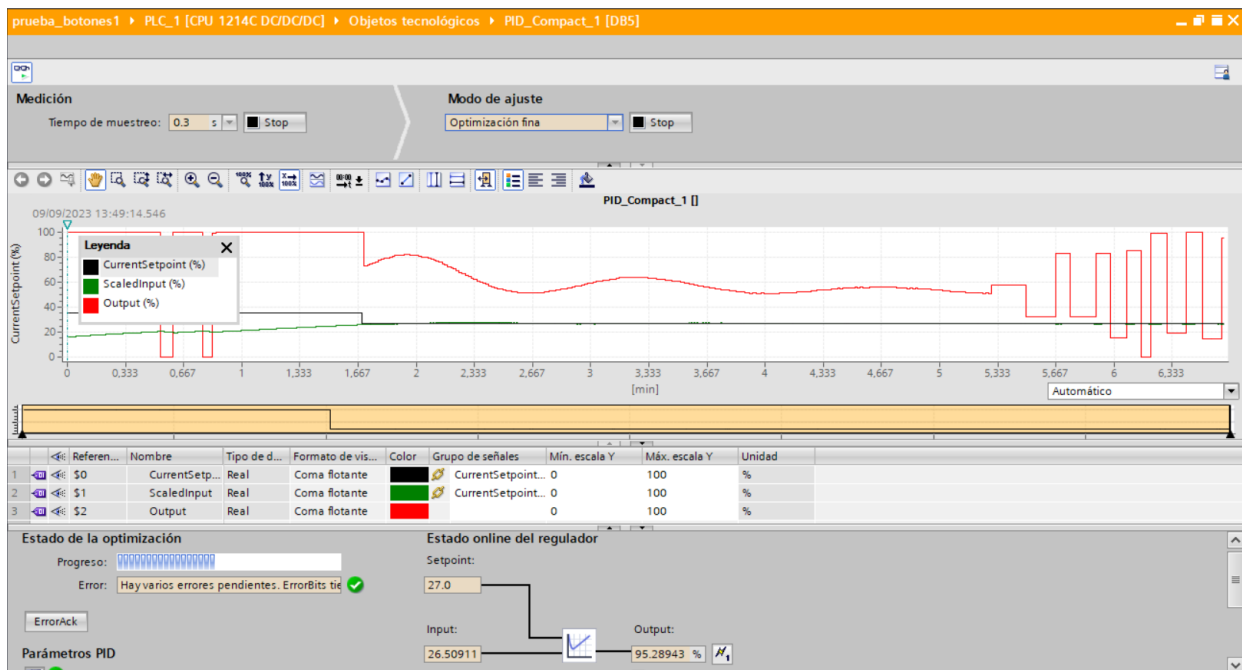


Figura 56. Controlador PID en modo de optimización fina

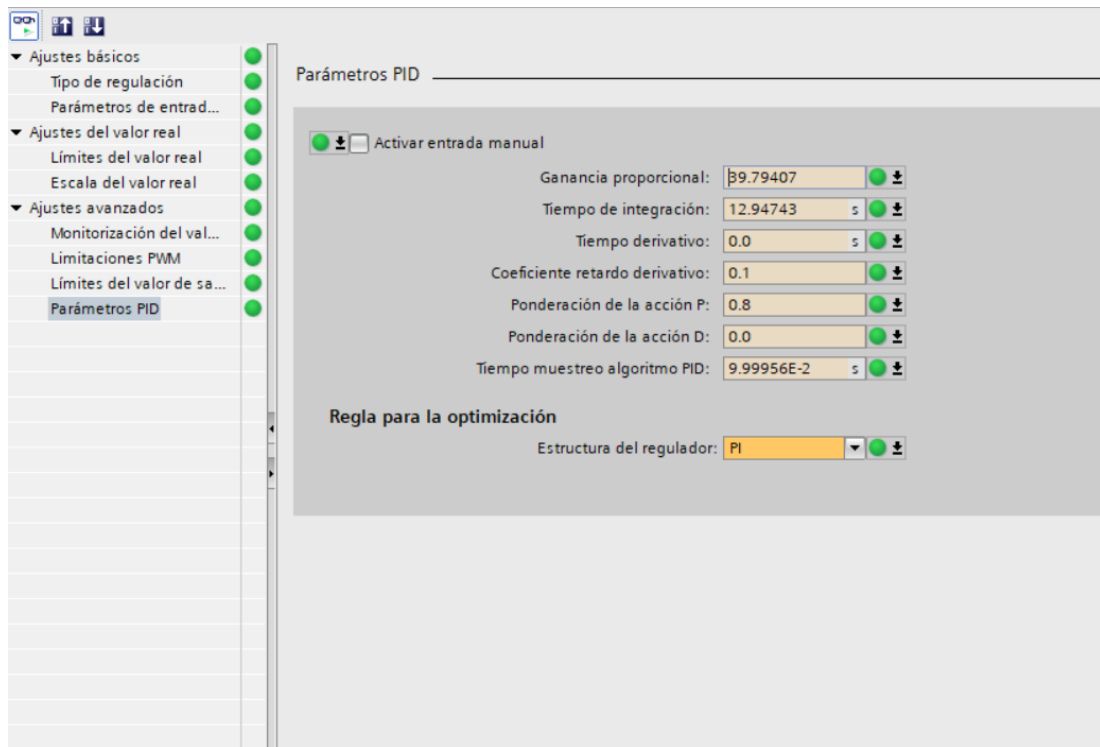


Figura 57. Parámetros establecidos por el controlador PID

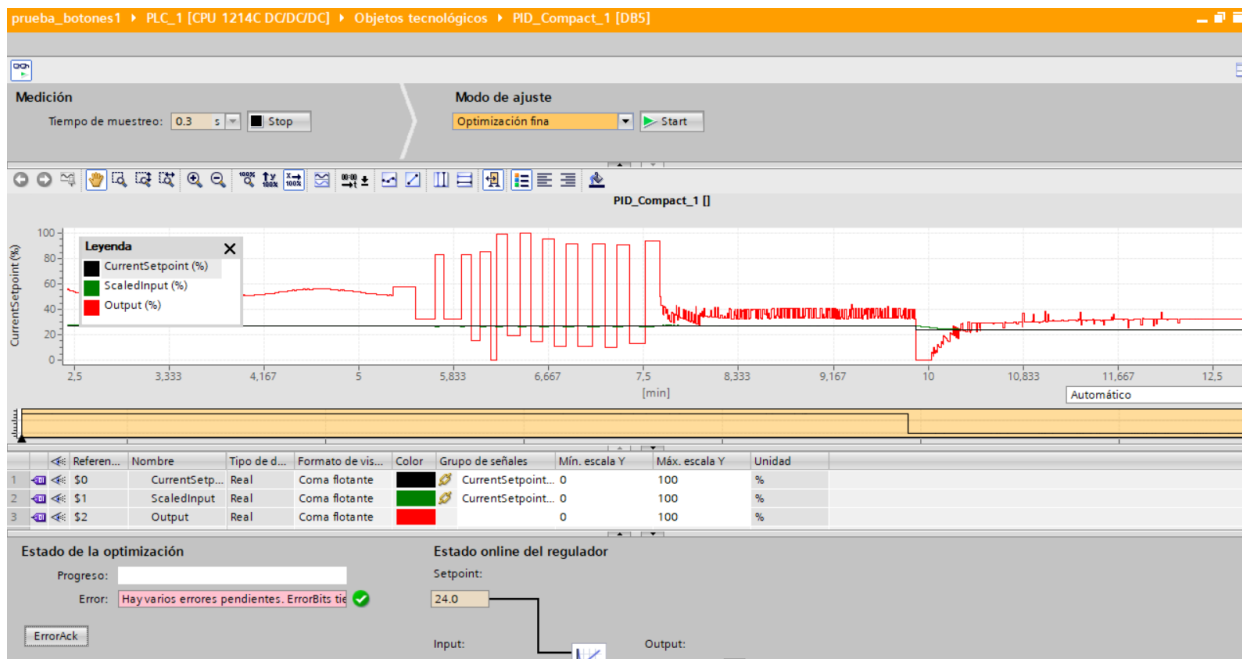


Figura 58. Controlador aplicado a la planta

VII. CRONOGRAMA

En la figura 59 y en la figura 60 se muestra la distribución de actividades

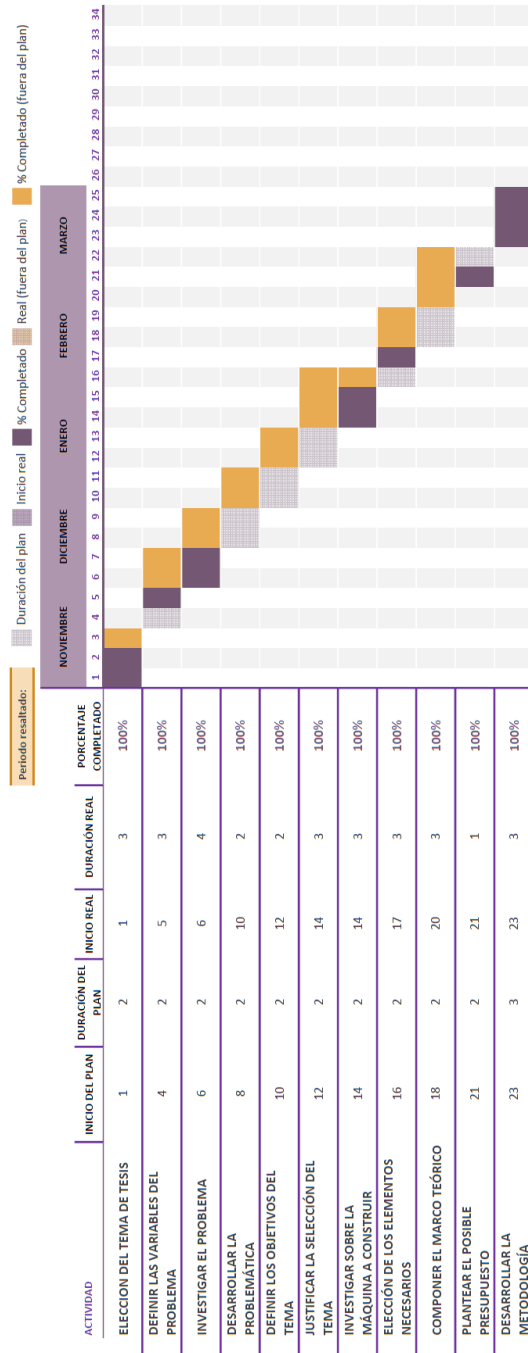


Figura 59. Cronograma de actividades anteproyecto. Fuente: Autor.



Figura 60. Cronograma de actividades proyecto final. Fuente: Autor.

VIII. PRESUPUESTO

MATERIALES PARA EL DISEÑO DEL MÓDULO DIDÁCTICO			
ELEMENTOS PARA LA PLANTA	COSTO/UNIDAD (\$)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (\$)
TANQUE DE ACRÍLICO	150,00	2,0	300,00
ACOPLE PARA TANQUE 1"	2,50	3,0	7,50
ADAPTADOR DE BRONCE DE 3/8" A ESPIGA	3,20	8,0	25,60
PERFIL L (METROS)	2,50	3,5	8,75
ABRAZADERAS DE LATÓN	0,30	20,0	6,00
TEFLÓN	0,80	2,0	1,60
ESPIGA EN L DE BRONCE 3/8"	2,50	10,0	25,00
SILICÓN TRANSPARENTE	3,00	4,0	12,00
SILICÓN NEGRO	4,00	1,0	4,00
EPÓXICO 4 MINUTOS	3,50	5,0	17,50
MANGUERA HIDRÁULICA 3/8" (METROS)	2,50	3,0	7,50
CONECTOR PVC DE 3/8" A 1/2"	1,50	5,0	7,50
MANGUERA TRANSPARENTE (METROS)	0,40	3,0	1,20
ADAPTADOR DE BRONCE MACHA/MACHO 3/8"	3,20	3,0	9,60
SIERRA DE COPA 17MM	13,25	1,0	13,25
BROQUERO PARA CENTRO DE SIERRA DE COPA	5,00	1,0	5,00
ARANDELAS 17MM	0,15	5,0	0,75
VÁLVULA DE BOLA DE BRONCE 3/8"	4,50	3,0	13,50
SENSOR DE PRESIÓN HIDROSTÁTICO (4-20 mA)	53,00	2,0	106,00
TABLERO METÁLICO 40X30X20 CM	42,00	1,0	42,00
PULSADORES DE METAL 22MM	1,40	2,0	2,80
PULSADOR HONGO METÁLICO 22MM	3,72	1,0	3,72
CANALETA GRIS 25X25 MM	3,26	1,0	3,26
RIEL DIM 35MM	1,69	1,0	1,69
BASE DE RIEL PARA RELÉ	5,87	1,0	5,87
RELÉ ENCAPSULADO DE 5 PINES	4,05	1,0	4,05
DISYUNTOR DE RIEL 2 POLOS 16 A	4,62	1,0	4,62
LUZ PILOTO 22MM	1,30	1,0	1,30
FUNDA TERMINALES PARA CABLE 18AWG	1,08	1,0	1,08
FUNDA TERMINALES PARA CABLE 14AWG	1,93	1,0	1,93
RELÉ 5 PINES 24V	5,00	2,0	10,00
BASE PARA RELÉ 5 PINES	5,50	2,0	11,00
PLACA ELECTRÓNICA	15,00	1,0	15,00
Precio final			680,57

Figura 61. Cuadro de costos para implementación de proyecto. Fuente: Autor.

IX. CONCLUSIONES

Para empezar, la repotenciación del módulo didáctico, permitió la creación de un sistema que servirá como un valioso recurso para la práctica y la formación de estudiantes y profesores. Este proyecto no solo demuestra la capacidad de diseñar y construir sistemas complejos, sino que también destaca el uso de tecnología de vanguardia en la ingeniería moderna, que beneficiará a la comunidad académica para abrir nuevas oportunidades de investigación en el campo de la automatización y el control de procesos. Además, con la implementación de un control PID mediante un PLC y un control por histéresis con el uso de LabVIEW, proporcionan una solución integral y avanzada para el manejo y monitoreo de estos tanques interconectados.

De la misma forma, se resalta la selección de los materiales para la construcción de los tanques, estos lograron ser una solución eficiente, económica y funcional. Brindaron una respuesta positiva, logrando pasar las pruebas de resistencia estructural, acorde a los parámetros calculados y simulaciones realizadas.

El control PID implementado para la planta, también forma parte de los resultados positivos del proyecto. Se logró afinar de tal manera que controla la variable del proceso con bastante precisión.

Por otro lado, la implementación de una HMI o de LabVIEW como interfaz de usuario, proporcionaron una solución versátil para controlar y monitorear la planta. Facilitaron el manejo del proceso, permitiendo que el usuario interactúe con la planta de manera más intuitiva.

Por último, el proyecto sobresale, no solo desde la construcción, sino que también por haber cumplido con los objetivos. Asimismo, la integración de todos los componentes resultó en un módulo de aprendizaje que ayudará a la formación de futuros profesionales.

X. RECOMENDACIONES

Para el diseño de controladores, es indispensable tener en cuenta el ruido en la señal que generan los sensores. Por ende, sería práctico poder implementar un filtro antes de realizar algún diseño que requiera mayor precisión y pocas oscilaciones.

Para la adquisición de datos con el PLC, es importante tener en cuenta la cantidad de bytes que ocupa cada marca en la memoria. En ocasiones, al intentar mantener un “orden”, se tiende a pasar por alto estos espacios en la memoria, lo que puede resultar en la superposición de ellas, generando interferencias a la hora de tratar señales.

El tanque de reserva está construido y probado para soportar la presión ejercida por un nivel de agua de 30cm; sin embargo, es recomendable tener el nivel hasta un máximo de 25cm.

En caso de almacenar la planta, es indispensable quitar toda el agua del reservorio y de los tanques de trabajo para evitar la acumulación de suciedad.

Entre las mejoras que puede tener la planta, está el incluir un sistema de drenado total del agua. Actualmente, la planta puede desfogar la mayor cantidad de agua a través de la válvula en el reservorio, pero siempre quedará un mínimo.

Para el cuidado de la planta, es correcto indicar que se debería realizar la limpieza de los tanques, al menos una vez al mes, independientemente del lugar donde se almacena la misma.

REFERENCIAS

- [1] N. Agudelo, G. Tano y C. A. Vargas, «Historia de la automatización,» *Bogota. Accessed: Nov*, vol. 1, 2020.
- [2] S. R. Fletcher, T. Johnson, T. Adlon et al., «Adaptive automation assembly: Identifying system requirements for technical efficiency and worker satisfaction,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, pág. 105 772, 2020, ISSN: 0360-8352.
- [3] E. M. Pérez, J. M. Acevedo y C. F. Silva, *Automatas programables y sistemas de automatización/PLC and Automation Systems*. Marcombo, 2009.
- [4] K. Åström y T. Hägglund, «The future of PID control,» *Control Engineering Practice*, vol. 9, n.º 11, págs. 1163-1175, 2001, PID Control, ISSN: 0967-0661.
- [5] K. Åström y T. Hägglund, «Advanced PID Control, ISA–The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709,» 2005.
- [6] A. Brunete, P. San Segundo y R. Herrera, *Introducción a la automatización industrial*. Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [7] R. Sanchis Llopis, J. A. Romero Pérez, C. Vicent Ariño et al., *Automatización industrial*. Universitat Jaume I, 2010.
- [8] M. Wendling, «Sensores,» *Universidade Estadual Paulista. São Paulo*, 2010.
- [9] J. E. O. Zacarías, «Sensor Óptico de Nivel de Líquidos,» *Centro de Investigaciones en Óptica. Guanajato - México*, 2015.
- [10] «Bombas de desplazamiento positivo,» *ASIPS*, 2021.
- [11] «FLO Small Water Pressure Pump,» *inf. tec.*,
- [12] L. Arnáez Braschi Enrique, *Enfoque práctico del control moderno: con aplicaciones con Matlab*. ECOE Ediciones, 2016.
- [13] S. Bharadwaj y S. Nagar, *Modern control Systems with Advance Topics*. New Age International, 2019.
- [14] S. Castaño, «Lazo abierto y lazo cerrado,» *Control Automático Educación*, 2023.
- [15] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. PEARSON, 2010.
- [16] «¿Qué es el control PID?» *Franklin Electric*, 2022.
- [17] Keviczky, Bars, Hethéssy y Bányász, *Control Engineering*. Springer, 2019.
- [18] R. Fenner, *The Conscientious Aquarist*. Nueva York: TFH Publications, 2008.
- [19] Siemens AG, *TIA Portal*, Versión 15.1, Siemens AG, 2023. dirección: <https://www.siemens.com/tia-portal>.

APÉNDICE A
MANUAL PRÁCTICO PARA CONTROL PID DEL NIVEL EN EL TANQUE 1

Práctica de laboratorio utilizando el controlador PID_Compact.

Para la práctica se utilizará un controlador PID para controlar el nivel del agua en el tanque 3.

Como primer punto, se creará un nuevo proyecto dentro del ambiente de TIA Portal, como se muestra en la figura 62. seguido, se coloca el nombre del proyecto y se elige la ubicación de guardado del mismo. Después se agrega un equipo, dando clic sobre el ícono “agregar dispositivo” como se muestra en la figura 63. Seguido se elige el modelo y referencia del PLC a utilizar, para el caso de la planta, se encuentra equipada con un PLC de las características mostradas en la figura 64.

Luego, en la ventana del lado izquierdo se ingresa al menú de bloques de programación para ingresar al main del PLC donde se llevará acabo la programación de la práctica, tal como se muestra en la figura 65.

Para la práctica se solicita al usuario diseñar un controlador PID para el manejo del nivel de agua en el tanque 1. Dicho nivel se convertirá en la variable de entrada, al mismo tiempo que se abre la válvula de salida del tanque 3 para crear la perturbación que afecte al sistema. En la práctica se hará uso de los siguientes elementos de la planta:

Elementos prácticos:

- Botón de marcha
- Botón de paro
- HMI
- Sensor del tanque 1
- Válvula de salida del tanque 3
- Bomba 1

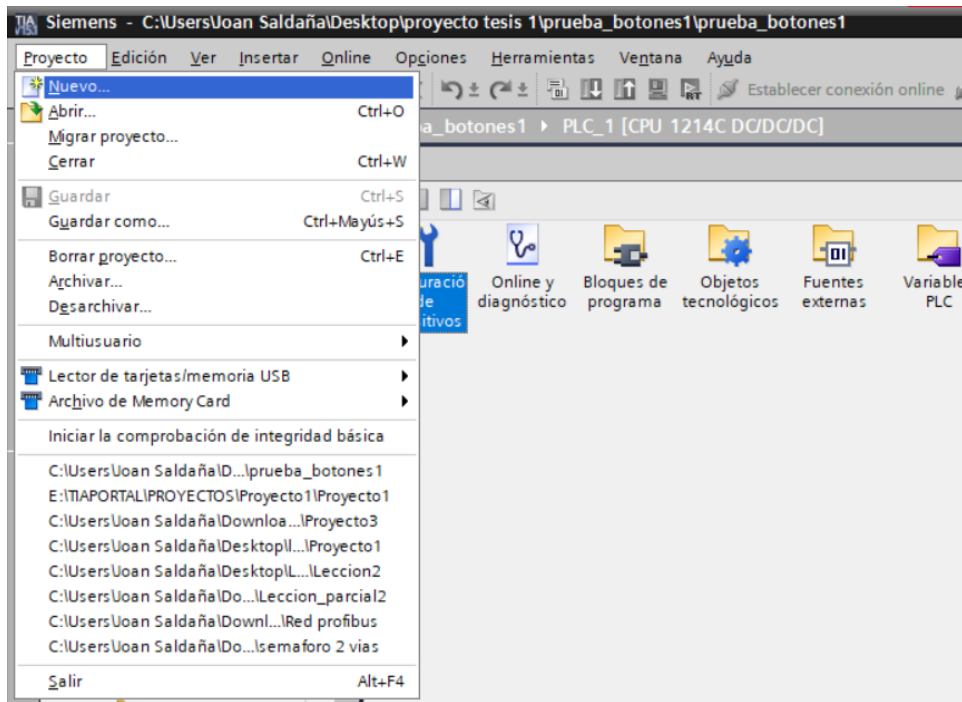


Figura 62. Creación de nuevo proyecto en TIA PORTAL

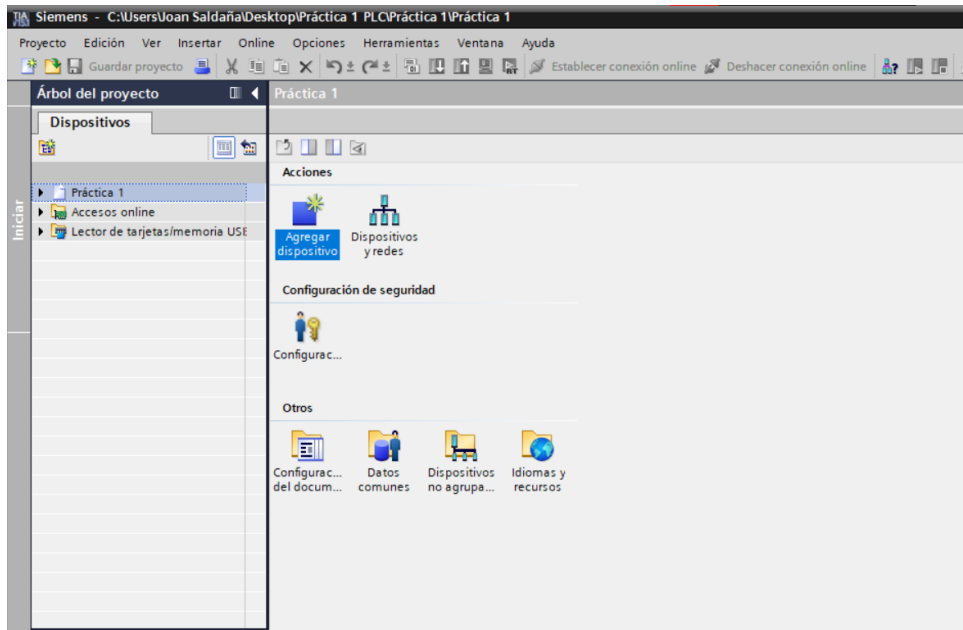


Figura 63. ícono para crear equipo

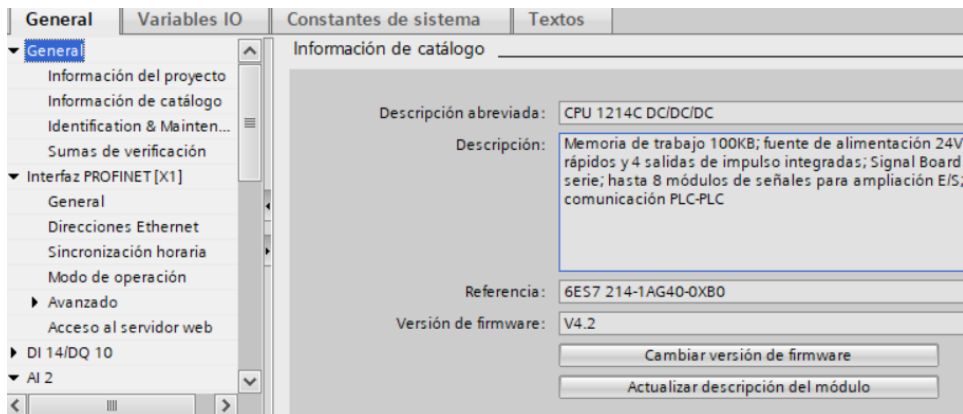


Figura 64. Información del modelo del PLC implementado en la planta

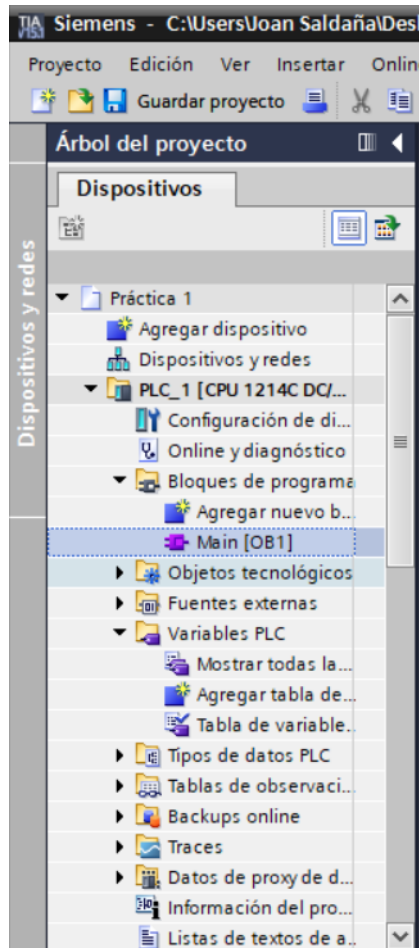


Figura 65. Bloque principal de programación del PLC

Una vez definida las necesidades de la práctica y los elementos necesarios para lograrla, se realizan los segmentos de programa:

- Bloque de enclavamiento
 Colocar contactos para realizar un enclavamiento como se muestra la figura 66, se disponen los contactos abierto para la marcha y el paro, puesto que el botón de parada con el que está equipada la planta es un botón normalmente cerrado.

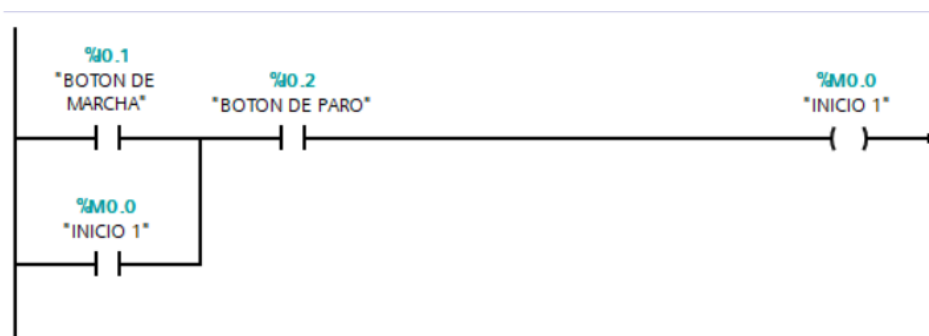


Figura 66. segmento de enclavamiento.

- Creación de Cycle interrupt

Los controladores PID en el PLC necesitan trabajar a un ciclo de trabajo mucho más bajo que programa principal, por ende, se crea un bloque de programa como se muestra en la figura 67 y luego seleccionando cycle interrupt con un tiempo de ciclo de 100ms, la selección se muestra en la figura 68

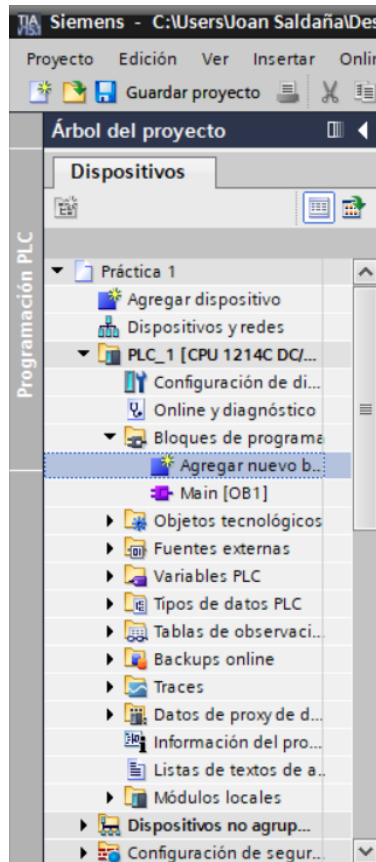


Figura 67. menú para crear nuevo bloque de programa.

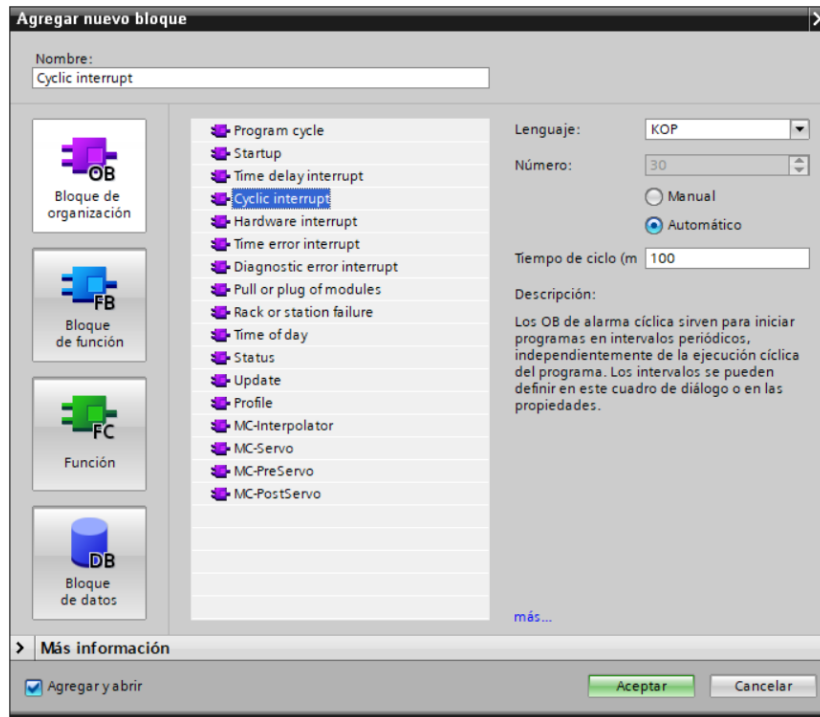


Figura 68. Bloque de programa cycle Interrupt

■ Programa dentro del Cycle interrupt

En el bloque de programa, en la ventana a la izquierda de la pantalla, se encuentran los bloques de tecnologías, dentro de él se hallará la función del PID_Compact, como se muestra en la figura 69. Luego se arrastra el bloque hasta los segmentos, quedando de la forma mostrada en la figura 70

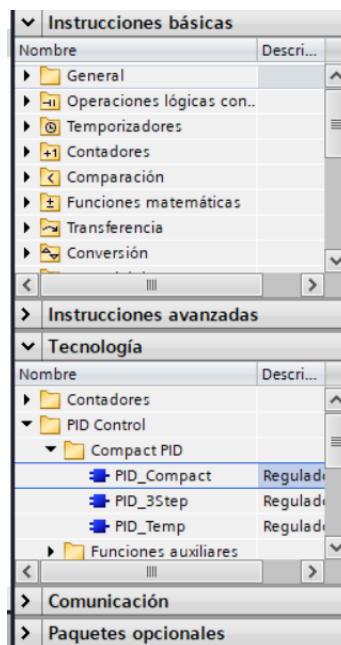


Figura 69. Ubicación del Bloque PID_Compact.

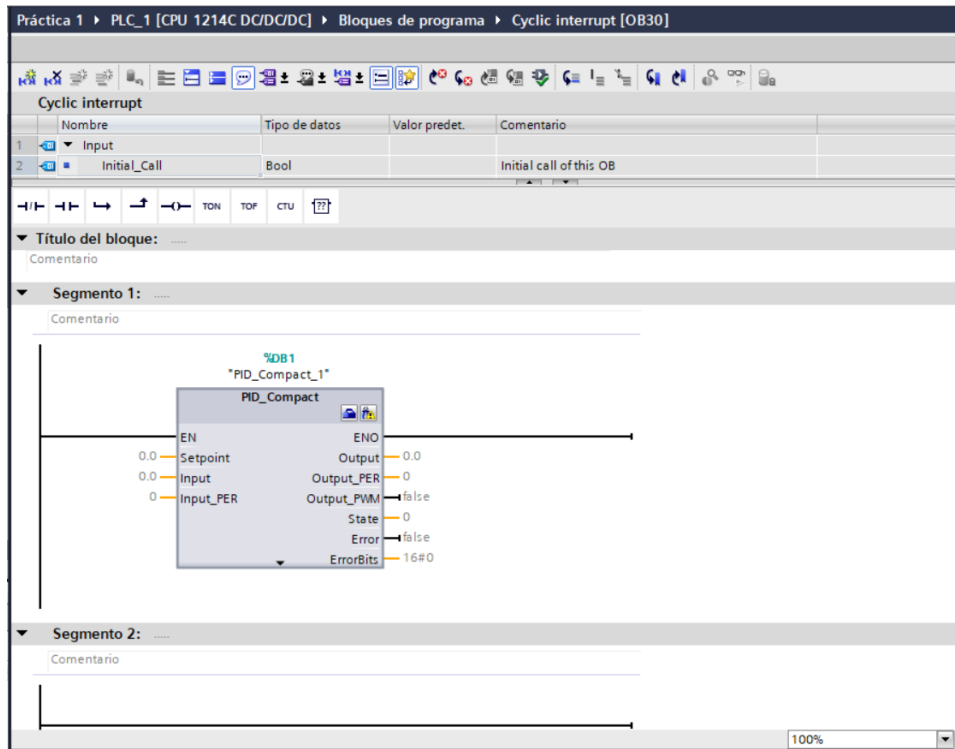


Figura 70. PID_Compact sobre el segmento de programación.

■ Entradas y marcas para el PID_Compact

Ahora, se ubican las marcas necesarias para utilizar el bloque. entre ella se necesita, la marca para habilitar el bloque de control, una marca donde se almacene la señal de entrada del sensor del tanque 1, una marca para el valor del set point proveniente del HMI y finalizando, una marca para la salida hacia la bobina de la bomba 1, la cual se manejará por medio de la señal por PWM que brinda el bloque de control. La disposición de los contactos queda como se muestra en la figura 71

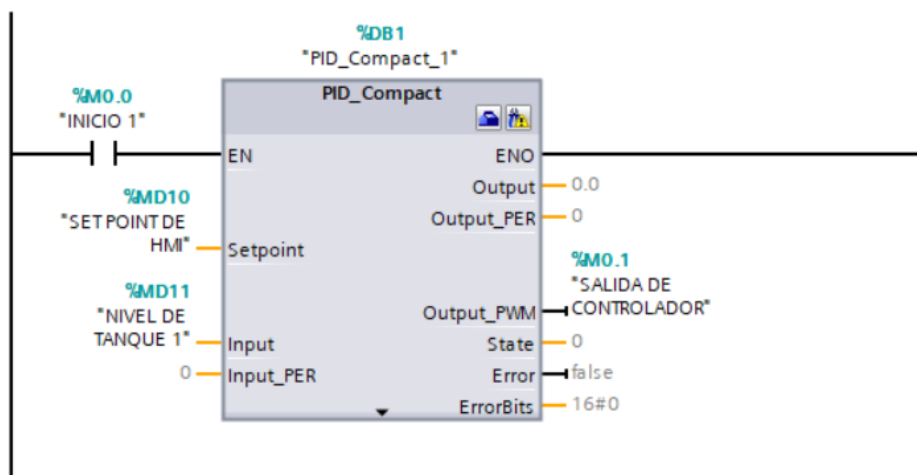


Figura 71. Conexión del PID_Compact con las marcas y contactos.

■ configuración PID_Compact

Dentro del bloque de control, se introducirán los parámetros para la captura de datos de la variable del nivel

a través del sensor 1. Primero se ingresa por medio del botón superior del bloque, como se muestra en la figura 72.

Una vez dentro, se ajustan los primeros parámetros como se muestra en la figura 73. El tipo de regulación se escoge de forma general porque se va a controlar un nivel, por ende se realiza por medio de porcentajes.

El control se coloca en modo manual, porque será activado más adelante por el usuario cuando comience el proceso.

En el parámetro de entrada se escoge Input, ya que ingresará una señal tratada con anterioridad. Más adelante se detallará el tratamiento necesario para la señal. Por último en estos ajustes, se coloca una salida en forma de PWM porque se utilizará la salida digital del PLC para controlar las bombas.

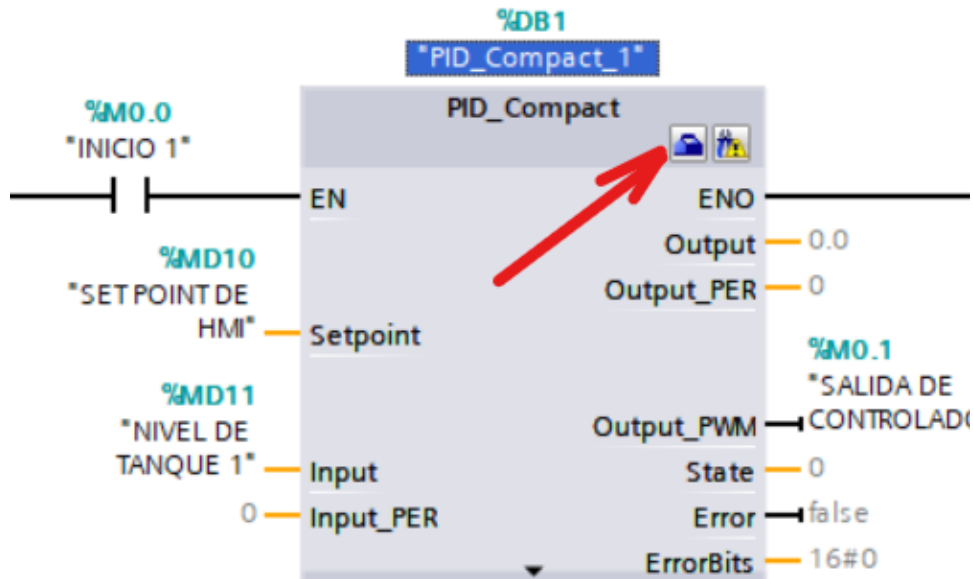


Figura 72. Ubicación del botón de configuración del bloque PID_Compact

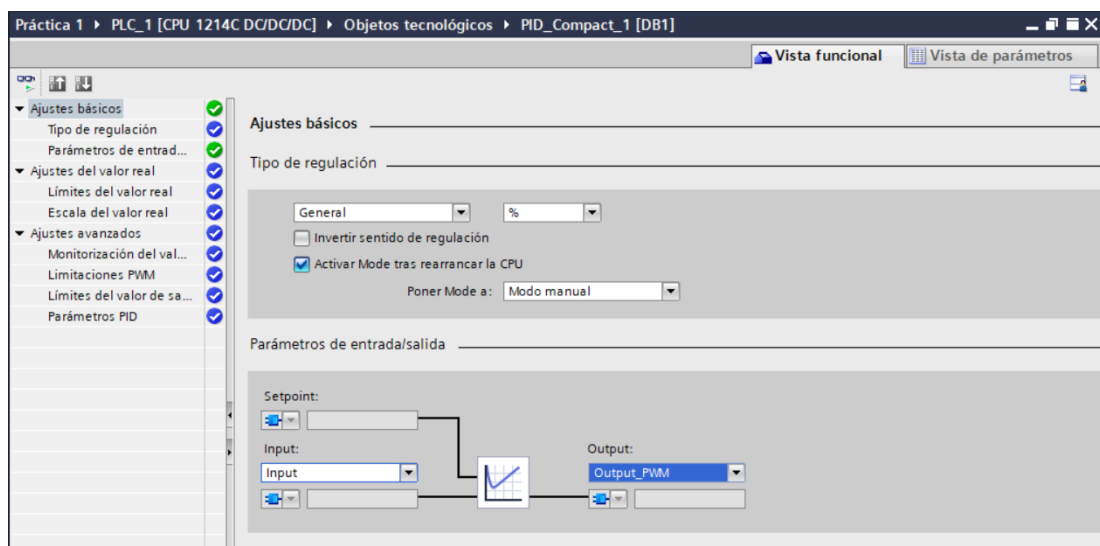


Figura 73. Ajuste de parámetros básicos

Para los ajustes de valor real se elige la escala mostrada en la figura 74, pues se determina el rango de lectura para el sensor utilizado. El otro escalado no se usará para la práctica.

Luego, entre las opciones avanzadas se configurarán los límites del valor de salida, estos representan la acción de control que se obtendrá a la salida del controlador, para el funcionamiento de los actuadores.

Para finalizar con la configuración de parámetros lo primordial es escoger la regla de optimización, para la práctica se escogerá un controlador PI como se muestra en la figura 76. Los valores de ganancia quedarán por determinado para comprobar el controlador en la planta.

Al finalizar se cierra la ventana y el controlador quedará listo para ser utilizado en la planta.

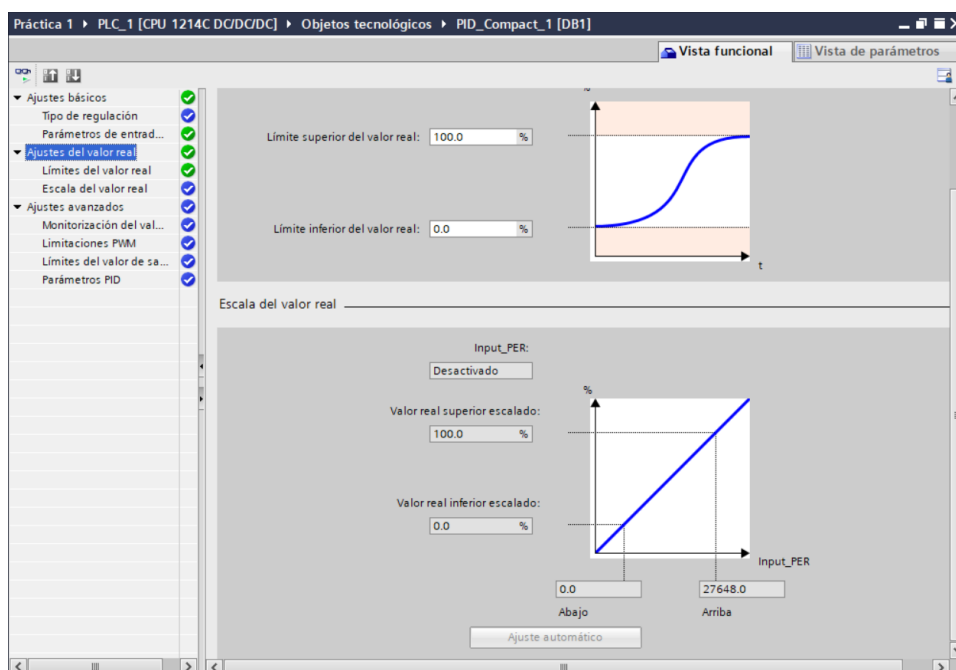


Figura 74. Ajustes de parámetros reales

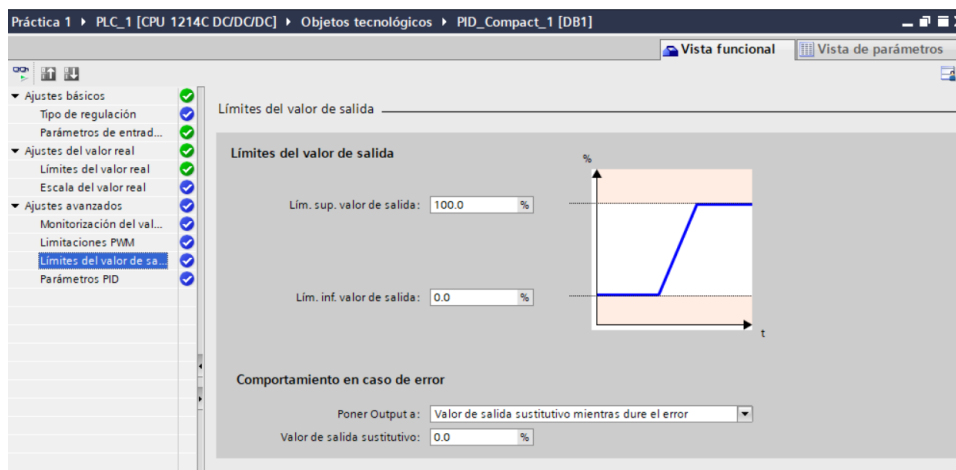


Figura 75. Parámetros de la acción de control de la salida

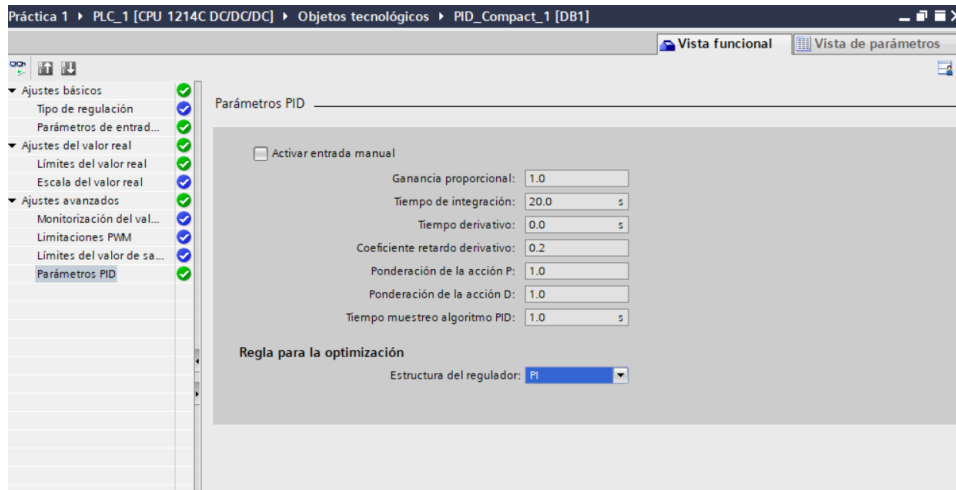


Figura 76. Parámetros para el controlador PID

- Adquisición de datos del sensor

Una vez que se termine de configurar el bloque del controlador se vuelve al bloque principal de programación del PLC para añadir las funciones que permitan el tratamiento de la señal analógica. En la figura 77 se muestran las funciones y contactos necesarios.

Con el segmento se logra adquirir la señal analógica del sensor a través de la entrada analógica del plc IA0, la cual internamente se identifica con la marca IW64, que se encuentra en la entrada del bloque de normalización, se transforma la señal de valores enteros a un valor real, luego se escala y finalmente se coloca un bloque que ayude a calibrar el error en la medición del sensor.

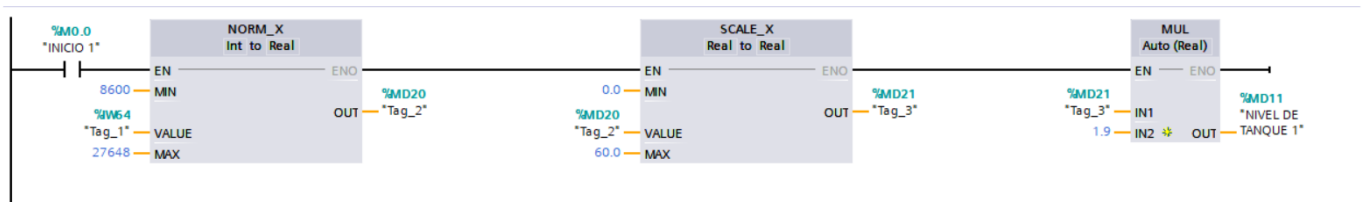


Figura 77. Tratamiento de la señal analógica del sensor del tanque 1

- Configuración del HMI

Para conectar con la interfaz gráfica y poder visualizar el proceso, se procede a configurar un HMI de la siguiente forma:

Primero como se muestra en la figura 78, se da doble clic para acceder a la ventana de selección de los dispositivos HMI. Luego, se procede a seleccionar el dispositivo, como se muestra en la figura 79. Es importante considerar seleccionar el modelo y placa del HMI utilizado en el tablero eléctrico para evitar errores de comunicación.

Una vez se elige el modelo correspondiente del HMI, se abre el asistente para la configuración inicial del mismo y, a continuación, como se muestra en la figura 80, se elige el PLC con el que se va a comunicar. Luego, se procede con la configuración de las características visuales y se culmina con la apertura del entorno de programación de la interfaz.

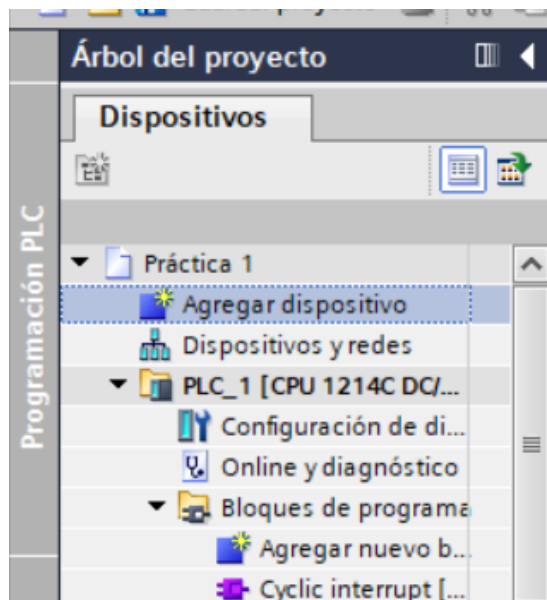


Figura 78. Menú para agregar los dispositivos

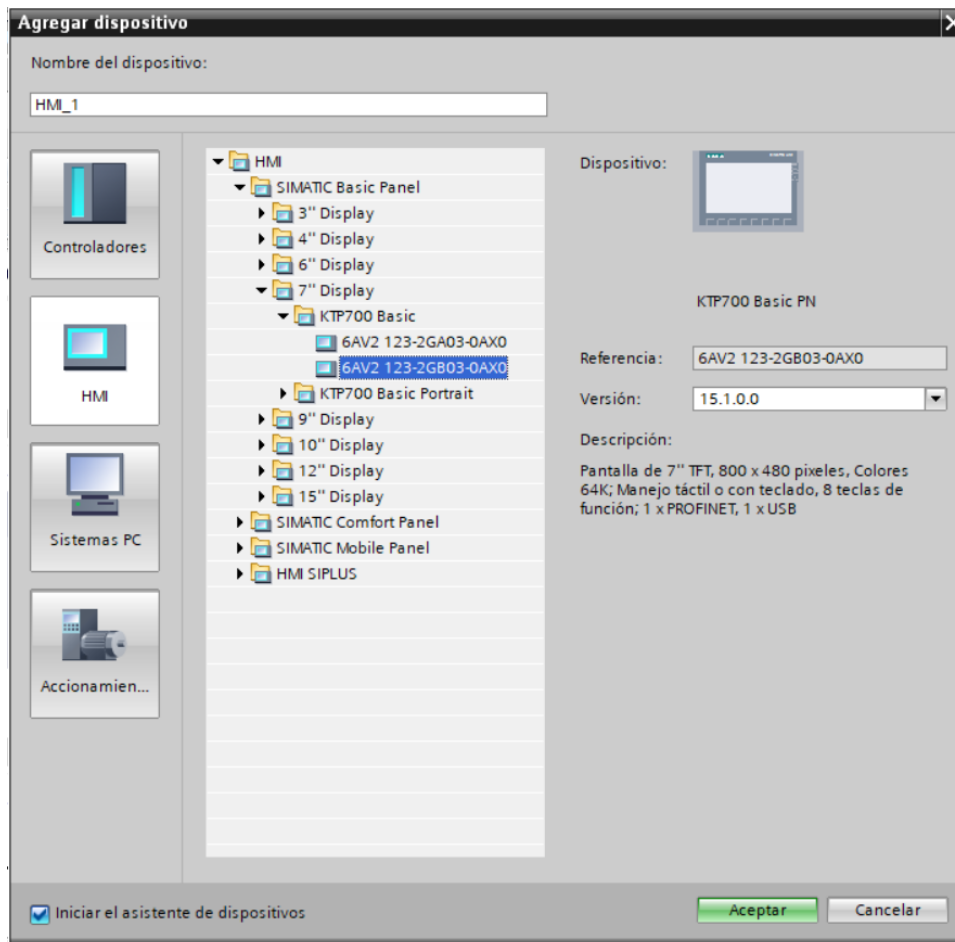


Figura 79. Ventana de selección para el HMI

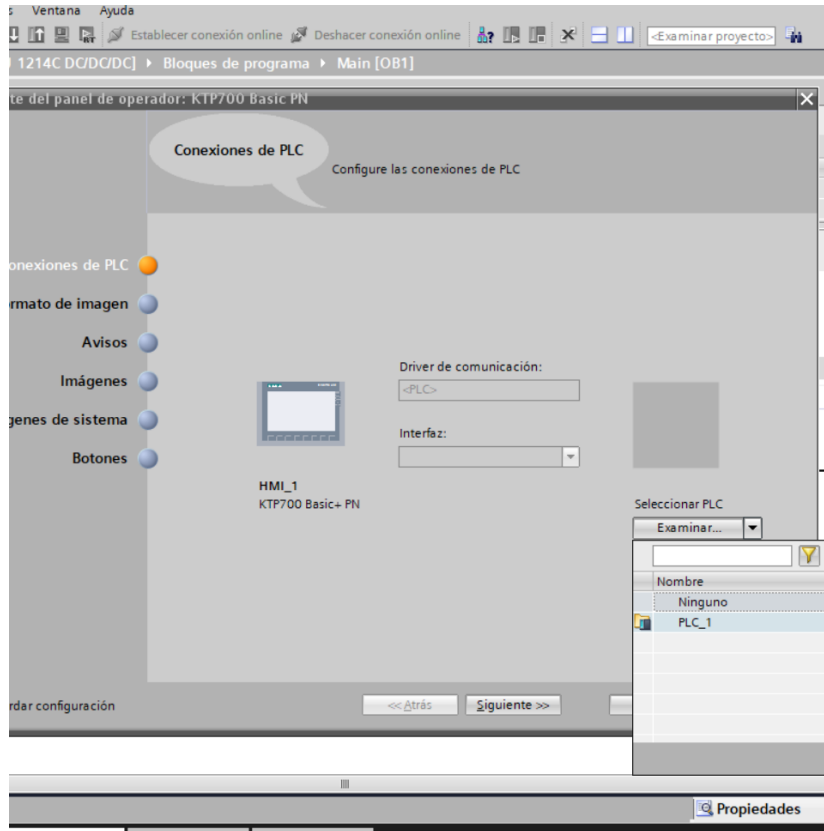


Figura 80. Selección del dispositivo PLC para el HMI

Una vez que se haya realizado los pasos anteriores, se procede a construir la interfaz gráfica, para ello, del lado izquierdo de la pantalla, como se muestra en la figura 81, se hallarán los elementos y objetos básicos necesarios para la construcción del mismo.

De allí, para la práctica se utilizarán las barras y los indicadores como se muestra en la figura 82, arrastrándolos hacia la ubicación deseada. La disposición final se encuentra en la figura 83.

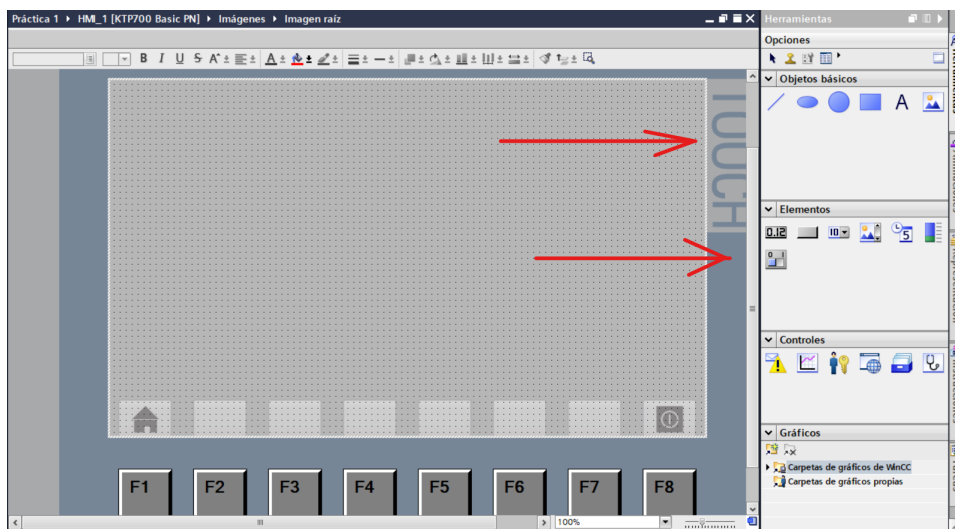


Figura 81. Árbol de herramientas visuales del HMI

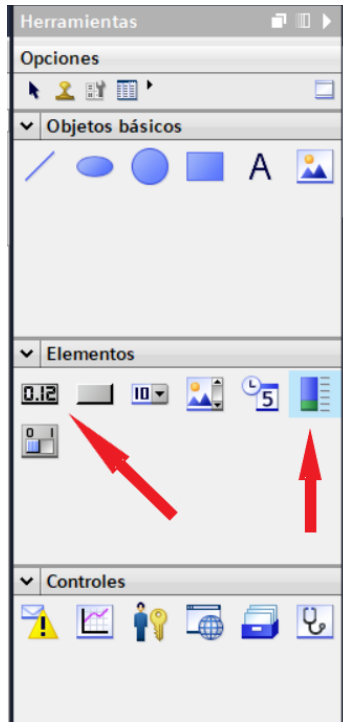


Figura 82. Barra de visualización e indicadores gráficos



Figura 83. Disposición final de los elementos visuales para la práctica

Finalmente se procede a enlazar cada elemento visual con su respectiva variable de acción, estas variables son aquellas que se ubicaron en los bloques de programación.

Se selecciona la barra de visualización y en la parte inferior se abre la ventana de propiedades de la misma. con la ventana abierta se selecciona la variable de acción como se muestra en la figura 84, en este caso la variable sería el nivel del tanque 1 como se definió anteriormente en la figura 77.

Seguido, para el indicador de la referencia, se deben establecer las configuraciones mostradas en la figura 85. Para ello se selecciona la variable de acción que sería la anteriormente definida como "SET POINT DE

HMI”, en la opción de “tipo”, se elige como un indicador solo de entrada, con un formato de dos números enteros.

Por último, para el indicador de nivel, tal como se muestra en la figura 86 se selecciona la variable de acción “NIVEL DEL TANQUE 1” de la misma forma como se lo hizo con la barra de visualización. Para el “tipo”, se elige como un elemento solo de salida, con un formato visual de dos números enteros.

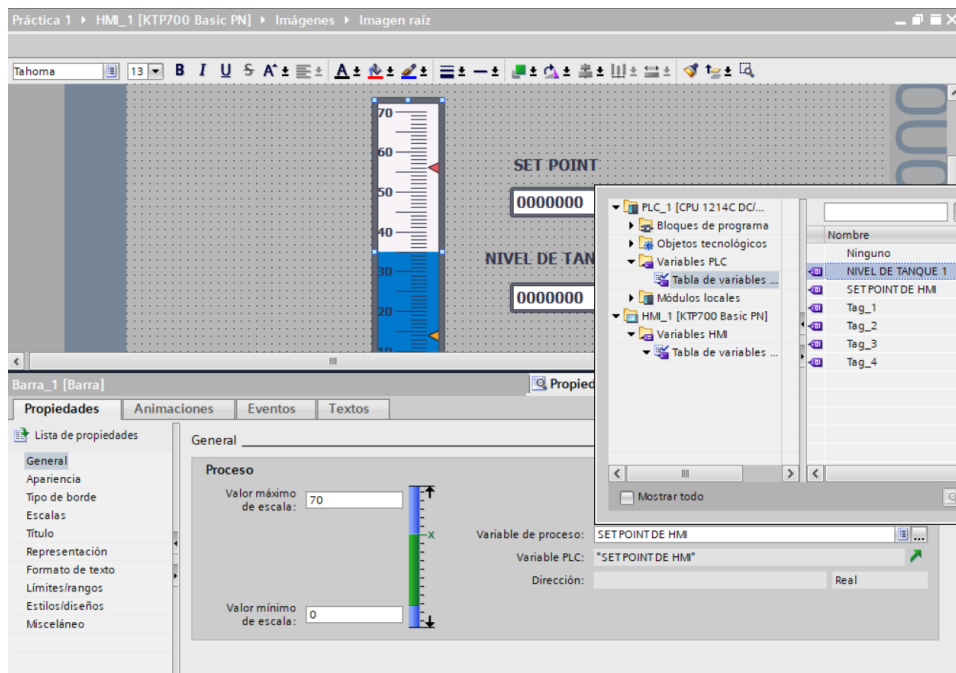


Figura 84. Enlace con la variable de acción de la barra de visualización

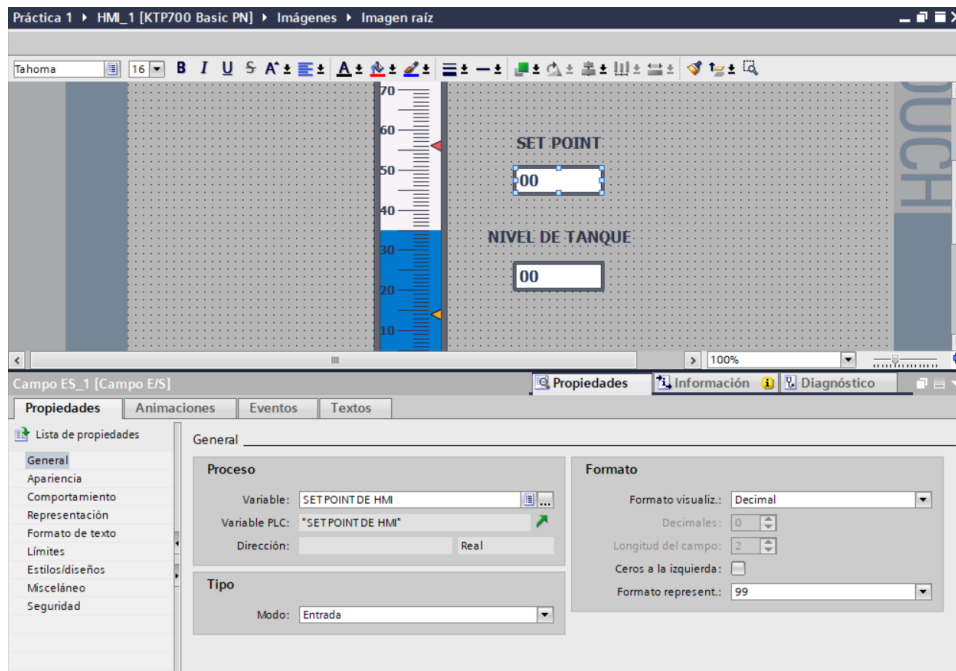


Figura 85. Enlace con la variable de acción del indicador del set point

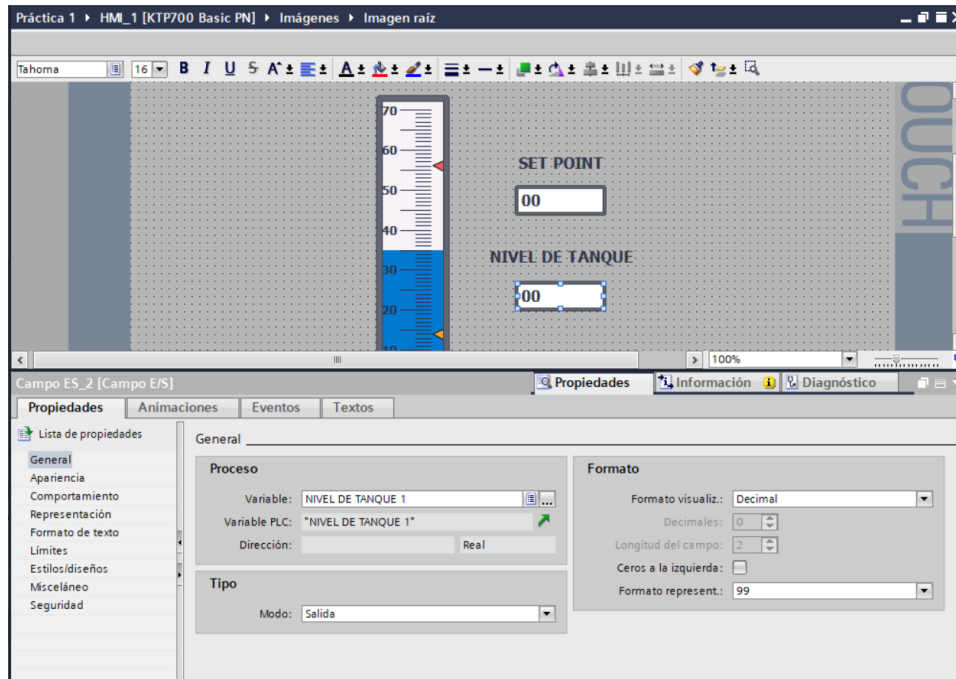


Figura 86. Enlace con la variable de acción del indicador de nivel

- Cargar el programa al PLC y HMI Para cargar el programa a los equipos se debe tener en cuenta que todos deben estar en la misma red LAN. Con la ayuda del swtich de ethernet de la planta, ésta puede establecer comunicación entre el PLC, HMI y la computadora.

Ahora, como se muestra en la figura 87, en el árbol de proyectos se da clic derecho sobre la pestaña del PLC. A continuación, en el submenú se selecciona la opción de “cargar en dispositivo” y se escoge “cargar todo”.

Después, se selecciona la placa de red del computador y el tipo de conexión que el computador mantiene con el PLC, en este caso “Directo a Slot 1 X1”. Luego, se inicia la búsqueda de equipos en la red, como se muestra en la figura 88, se selecciona el PLC de la planta y se presiona el botón de cargar.

Posteriormente, aparece una ventana como se muestra en la figura 89, donde ocurre la compilación de los segmentos de la programación y se verifica la correcta disposición de los mismos. En caso de no haber errores, todos los destinos marcarán un visto.

En caso de estar todo correctamente programado y verificado, aparecerá la ventana mostrada en la figura 90, donde se seleccionará la acción de “arrancar módulo”. Por último se da clic en el botón “Finalizar”, y el PLC estará listo para funcionar acorde a lo programado.

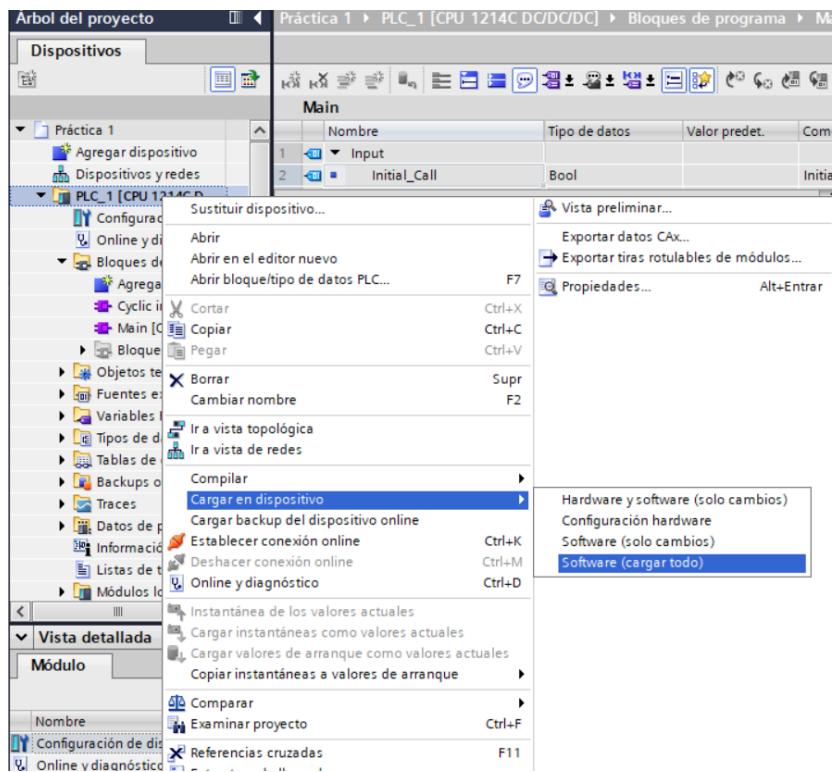


Figura 87. Menú para cargar programación en PLC

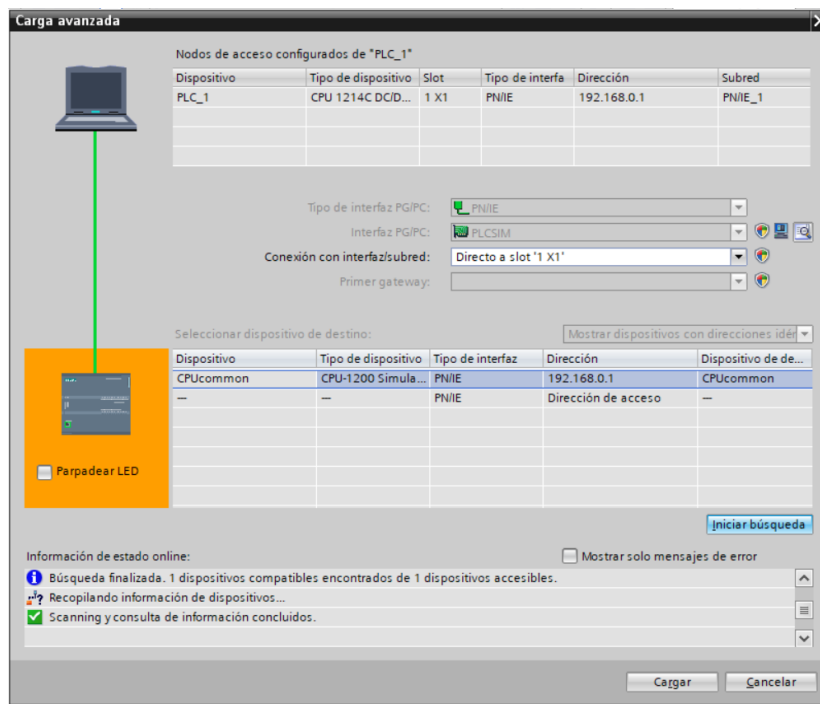


Figura 88. Ventana de búsqueda y selección de PLC

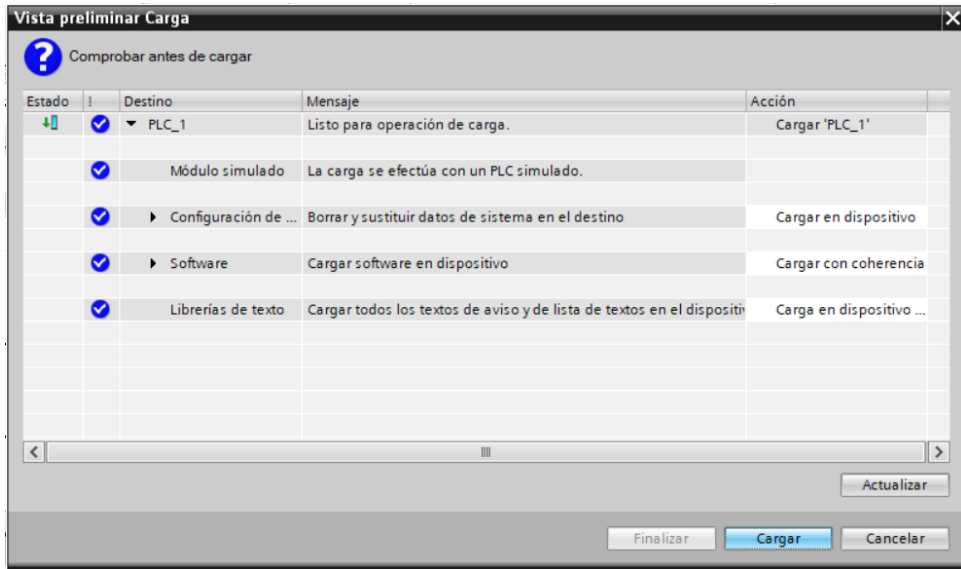


Figura 89. Ventana del compilador de programas del PLC

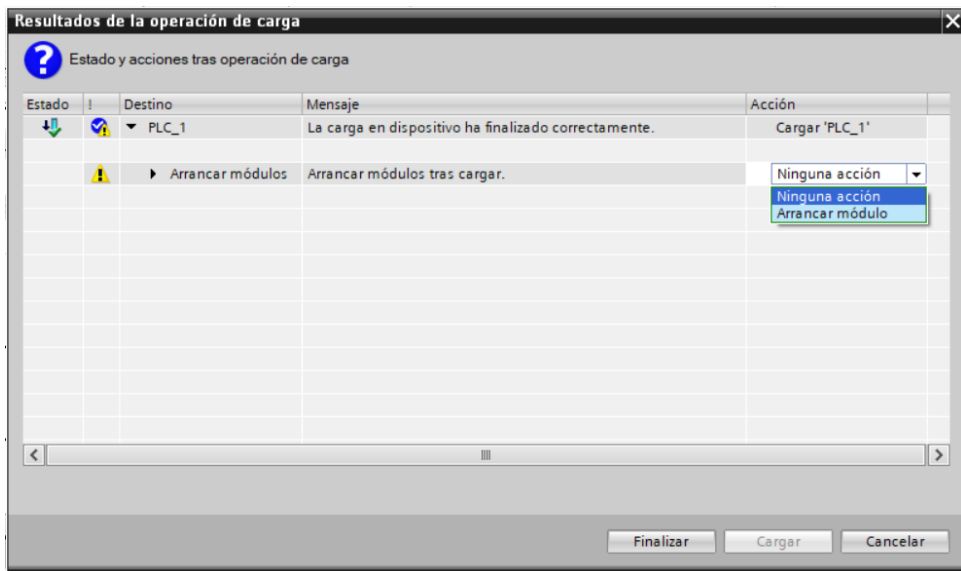


Figura 90. Ventana de resultados del compilador del PLC

APÉNDICE B
MARQUILLADO DE CABLES

ELEMENTO DE PARTIDA	PIN DE SALIDA	MARQUILLA EN CONDUCTOR	ELEMENTO DE LLEGADA	PIN DE ENTRADA
BORNE DE ALIMENTACIÓN	FASE	0.	DISYUNTOR	POLO 1
BORNE DE ALIMENTACIÓN	NEUTRO	1.	DISYUNTOR	POLO 2
BORNE DE ALIMENTACIÓN	TIERRA	2.	BORNERA 0.0	ENTRADA
DISYUNTOR	POLO 1	0.0	FUENTE PLC	FASE
DISYUNTOR	POLO 2	1.0	FUENTE PLC	NEUTRO
BORNERA 0.0	SALIDA	2.0	FUENTE PLC	TIERRA
DISYUNTOR	POLO 1	0.1	FUENTE 2	FASE
DISYUNTOR	POLO 2	1.1	FUENTE 2	NEUTRO
BORNERA 0.0	SALIDA	2.1	FUENTE 2	TIERRA
FUENTE PLC	POSITIVO	3.	PLC	ALIMENTACIÓN +
FUENTE PLC	POSITIVO	3.1	HMI	ALIMENTACIÓN +
FUENTE 2	POSITIVO	3.2	PLC	POSITIVO SALIDAS DIGITALES
FUENTE 2	POSITIVO	3.3	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 1 +
FUENTE 2	POSITIVO	3.4	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 2 +
FUENTE 2	POSITIVO	3.5	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 3 +
FUENTE 2	POSITIVO	3.6	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 1 +
FUENTE 2	POSITIVO	3.7	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 2 +
FUENTE 2	POSITIVO	3.8	BOTONES DE ACCIÓN	ENTRADAS
FUENTE PLC	NEGATIVO	4.	PLC	ALIMENTACIÓN -
FUENTE PLC	NEGATIVO	4.1	HMI	ALIMENTACIÓN -
FUENTE PLC	NEGATIVO	4.2	FUENTE 2	ALIMENTACIÓN -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.3	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 1 -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.4	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 2 -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.5	PLACA ELECTRÓNICA	POWER SENSOR 3 -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.6	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 1 -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.7	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 2 -
FUENTE 2	NEGATIVO	4.8	RELÉ 1	A0
PLC	NEGATIVO SALIDAS DIGITALES	4.9	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 1 -
PLC	NEGATIVO SALIDAS DIGITALES	4.1.0	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 2 -
FUENTE PLC	NEGATIVO	4.1.1	PLC	NEGATIVO ENTRADAS DIGITALES
FUENTE 2	NEGATIVO	4.1.2	PLC	NEGATIVO ENTRADAS ANALÓGICAS
FUENTE 2	NEGATIVO	4.1.3	LUZ PILOTO	ENTRADA 1

Figura 91. Marquillado de cable sección 1. Fuente. Autor

ELEMENTO DE PARTIDA	PIN DE SALIDA	MARQUILLA EN CONDUCTOR	ELEMENTO DE LLEGADA	PIN DE ENTRADA
BOTON DE MARCHA	SALIDA	5.1	PLC	DI 0.1
BOTON DE PARO	SALIDA	5.2	PLC	DI 0.2
SELECTOR DERECHA	SALIDA	5.3	PLC	DI 0.4
SELECTOR IZQUIERDA	SALIDA	5.4	PLC	DI 0.5
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR SIGNAL OUT 1	5.5	PLC	AI 0
RELÉ 1	COMÚN	5.6	PLC	AI 1
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR SIGNAL OUT 2	6.	RELÉ 1	CONTACTO CERRADO
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR SIGNAL OUT 3	6.1	RELÉ 1	CONTACTO ABIERTO
PLC	Q 0.0	7.	RELÉ 1	A1
PLC	Q 0.1	7.1	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 1 +
PLC	Q 0.2	7.2	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 2 +
PLC	Q 0.3	7.3	LUZ PILOTO	ENTRADA 2
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 1 +	8.	BORNERA DE SALIDA	B1
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 1 -	8.1	BORNERA DE SALIDA	B2
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 2 +	8.2	BORNERA DE SALIDA	B3
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 2 -	8.3	BORNERA DE SALIDA	B4
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 3 +	8.4	BORNERA DE SALIDA	B5
PLACA ELECTRÓNICA	SENSOR 3 -	8.5	BORNERA DE SALIDA	B6
PLACA ELECTRÓNICA	SALIDA BOMBA 1 +	8.6	BORNERA DE SALIDA	B9
PLACA ELECTRÓNICA	SALIDA BOMBA 1 -	8.7	BORNERA DE SALIDA	B7
PLACA ELECTRÓNICA	SALIDA BOMBA 2 +	8.8	BORNERA DE SALIDA	B9
PLACA ELECTRÓNICA	SALIDA BOMBA 2 -	8.9	BORNERA DE SALIDA	B8
RELÉ BOMBA 1	COMÚN	4.6	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 1 -
RELÉ BOMBA 1	A0	4.6	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 1 -
RELÉ BOMBA 1	A1	7.1	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 1 +
RELÉ BOMBA 1	CONTACTO ABIERTO	8.7	BORNERA DE SALIDA	B7
RELÉ BOMBA 2	COMÚN	4.7	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 2 -
RELÉ BOMBA 2	A0	4.7	PLACA ELECTRÓNICA	ALIMENTACIÓN BOMBA 2 -
RELÉ BOMBA 2	A1	7.2	PLACA ELECTRÓNICA	PLC 2 +
RELÉ BOMBA 2	CONTACTO ABIERTO	8.9	BORNERA DE SALIDA	B8

Figura 92. Marquillado de cable sección 2. Fuente. Autor

APÉNDICE C

BLOQUE DE CONTROL PID_COMPACT

Parámetros de entrada PID_Compact V2 (S7-1200, S7-1500)

Parámetros de entrada PID_Compact V2



Parámetro	Tipo de datos	Ajuste pre-terminado	Descripción
Setpoint	REAL	0.0	Consigna del regulador PID en modo automático
Input	REAL	0.0	Una variable del programa de usuario se utiliza como origen del valor real. Si utiliza el parámetro Input, debe cumplirse lo siguiente: Config.InputPer-On = FALSE.
Input_PER	INT	0	Una entrada analógica se utiliza como origen del valor real. Si utiliza el parámetro Input_PER, debe cumplirse lo siguiente: Config.InputPer-On = TRUE.
Disturbance	REAL	0.0	Magnitud perturbadora o valor de control anticipativo
ManualEnable	BOOL	FALSE	<ul style="list-style-type: none"> El flanco FALSE -> TRUE activa el modo de operación "Modo manual", State = 4, Mode no cambia. <p>Mientras se cumple ManualEnable = TRUE, no es posible cambiar el modo de operación mediante un flanco ascendente en ModeActivate, ni utilizar el diálogo de puesta en servicio.</p> <ul style="list-style-type: none"> El flanco TRUE -> FALSE activa el modo de operación especificado en Mode. <p>Se recomienda cambiar el modo de operación solo mediante ModeActivate.</p>
ManualValue	REAL	0.0	Valor manual Este valor se utiliza en modo manual como valor de salida. Se admiten valores entre Config.OutputLowerLimit y Config.OutputUpperLimit
ErrorAck	BOOL	FALSE	<ul style="list-style-type: none"> Flanco FALSE -> TRUE <p>ErrorBits y Warning se desactivan.</p>
Reset	BOOL	FALSE	Realiza un rearranque completo del regulador. <ul style="list-style-type: none"> Flanco FALSE -> TRUE <ul style="list-style-type: none"> Cambio al modo de operación "Inactivo"

- 1 -

Figura 93. Entradas del bloque PID_Compact. Fuente. [19]

Parámetros de salida PID_Compact V2



Parameter	Tipo de datos	Ajuste predeterminado	Descripción
ScaledInput	REAL	0.0	Valor real escalado
Las salidas "Output", "Output_PER" y "Output_PWM" pueden utilizarse paralelamente.			
Output	REAL	0.0	Valor de salida en el formato REAL
Output_PER	INT	0	Valor de salida analógico
Output_PWM	BOOL	FALSE	Valor de salida modulado por ancho de impulso El valor de salida se obtiene mediante tiempos de conexión y desconexión variables.
SetpointLimit_H	BOOL	FALSE	Si SetpointLimit_H = TRUE se cumple, significa que se ha alcanzado el límite superior absoluto de la consigna (Setpoint \geq Config.SetpointUpperLimit). La consigna está limitada a Config.SetpointUpperLimit .
SetpointLimit_L	BOOL	FALSE	Si SetpointLimit_L = TRUE se cumple, significa que se ha alcanzado el límite inferior absoluto de la consigna (Setpoint \leq Config.SetpointLowerLimit). La consigna está limitada a Config.SetpointLowerLimit .
InputWarning_H	BOOL	FALSE	Cuando InputWarning_H = TRUE, significa que se ha alcanzado o rebasado el límite superior de advertencia del valor real.
InputWarning_L	BOOL	FALSE	Cuando InputWarning_L = TRUE, significa que se ha alcanzado o rebasado por defecto el límite inferior de advertencia del valor real.
State	INT	0	El parámetro State indica el modo de operación actual del regulador PID. El modo de operación se cambia con el parámetro de entrada Mode y un flanco ascendente en ModeActivate. <ul style="list-style-type: none"> • State = 0: Inactivo • State = 1: optimización inicial • State = 2: Optimización fina • State = 3: Modo automático • State = 4: Modo manual • State = 5: Valor de salida sustitutivo con monitorización de errores

- 1 -

Figura 94. Salidas del bloque PID_Compact. Fuente. [19]

APÉNDICE D
COMUNICACIÓN ENTRE PLC Y LABVIEW A TRAVÉS DE OPC SERVER

Primero, se necesita que en el equipo de trabajo se encuentre instalado el software de labVIEW, con el software se tendrá acceso a un servidor OPC ubicado en el espacio mostrado en la figura 95, al darle clic derecho se muestra el menú donde se podrá ingresar a las configuraciones. luego se en la ventana de configuraciones se procede a crear un nuevo canal, como se muestra en la figura 96, se coloca un nombre al canal y se continua con los pasos. En la siguiente ventana se selecciona el driver del equipo utilizado como tarjeta de adquisición de datos, en el presente proyecto, se escogerá la opción “Siemens TCP/IP Ethernet”, como se muestra en la figura 97 y se da clic en siguiente. Se elige la tarjeta de red del equipo, en la figura 98 se coloca un ejemplo. Luego se mostrarán dos ventanas con parámetros que se dejarán por determinado, por lo cual solo se avanzará con la configuración hasta el final, obteniendo los resultados como se muestra en la figura 99 .

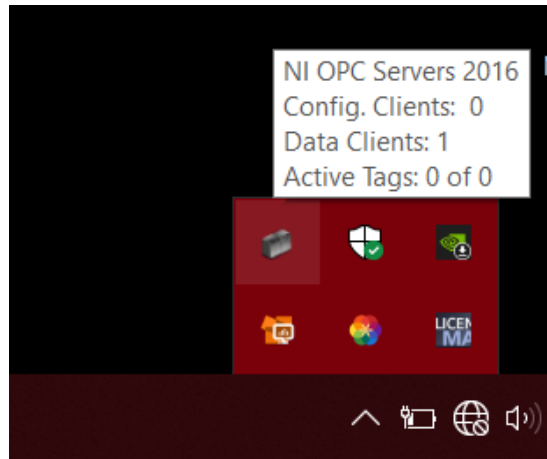


Figura 95. Ícono de servidor OPC

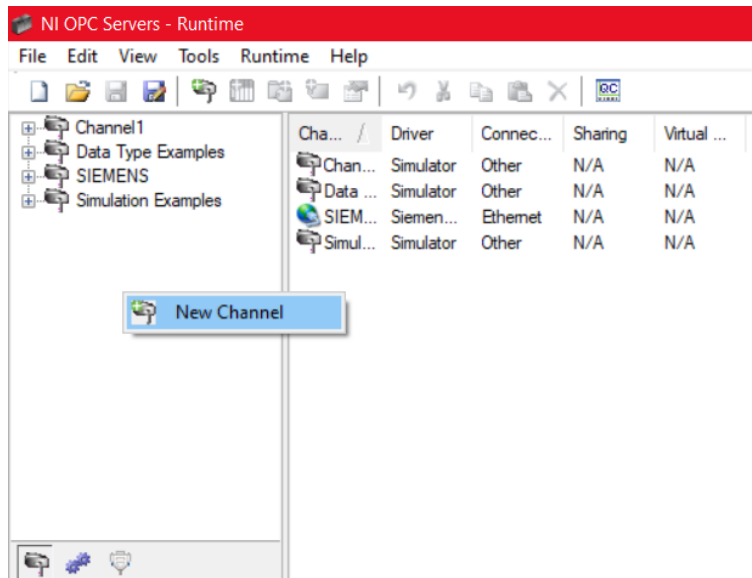


Figura 96. Ventana de configuraciones del servidor OC

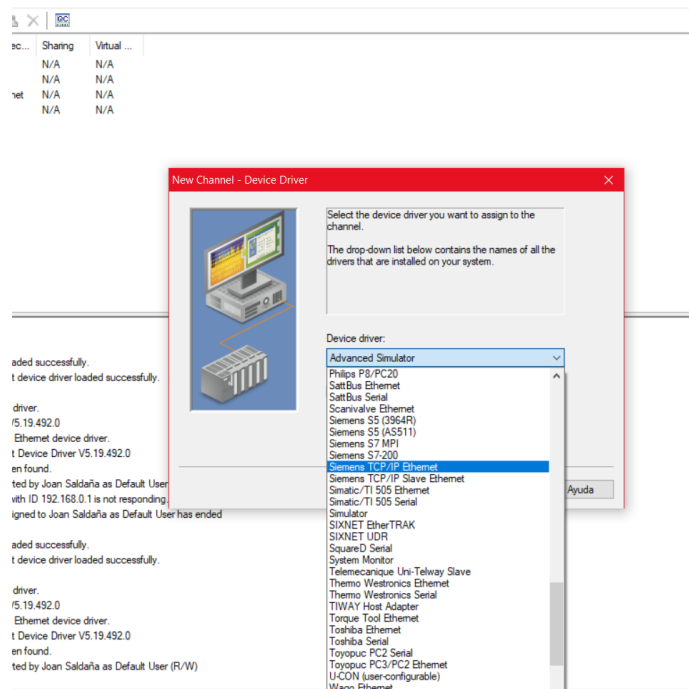


Figura 97. Ventana de selección para el driver del PLC

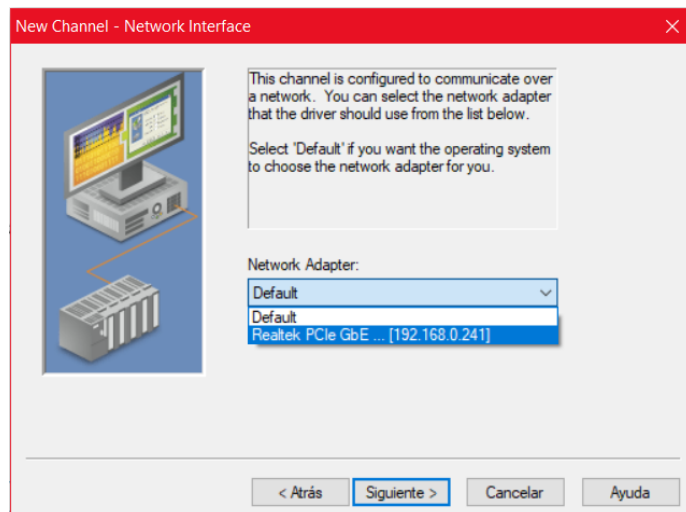


Figura 98. Ventana de selección de la interfaz para la red de trabajo

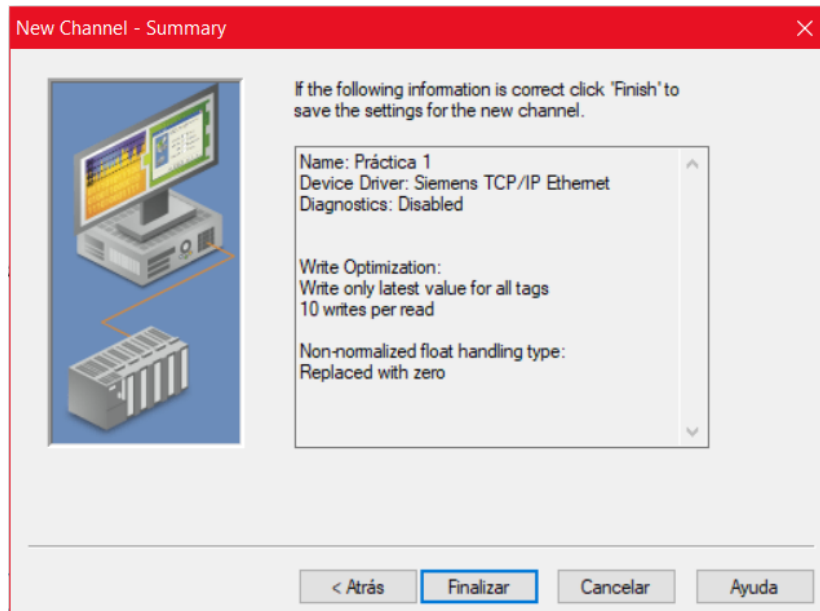


Figura 99. Ventana final de la configuración para canal de comunicación

Con el canal creado, ahora se procede a crear el dispositivo, para ello hay que tener en cuenta el tipo de PLC que se está utilizando y la red LAN en la que se encuentran los dispositivos. Debajo del canal creado, en este caso se lo nombró “Práctica 1” como se lo muestra en la figura 96, se procede colocando el nombre del dispositivo, indistintamente puede ser cualquier nombre, en el presente caso se lo nombrará “PLC” como se muestra en la figura 100.

Al continuar, se seleccionará el modelo de equipo con el que se está trabajando; en el proyecto se dispone de un PLC S7-1200. En la figura 101, el ejemplo de selección.

Seguido, aparecerá la ventana para colocar el IP con el cual trabaja el equipo, para ello se puede ir hasta el TIA Portal y visualizar la IP configurada en el PLC, como se muestra en la figura 102 y después se procede a colocarse en la ventana del OPC Server, como se muestra en la figura 103.

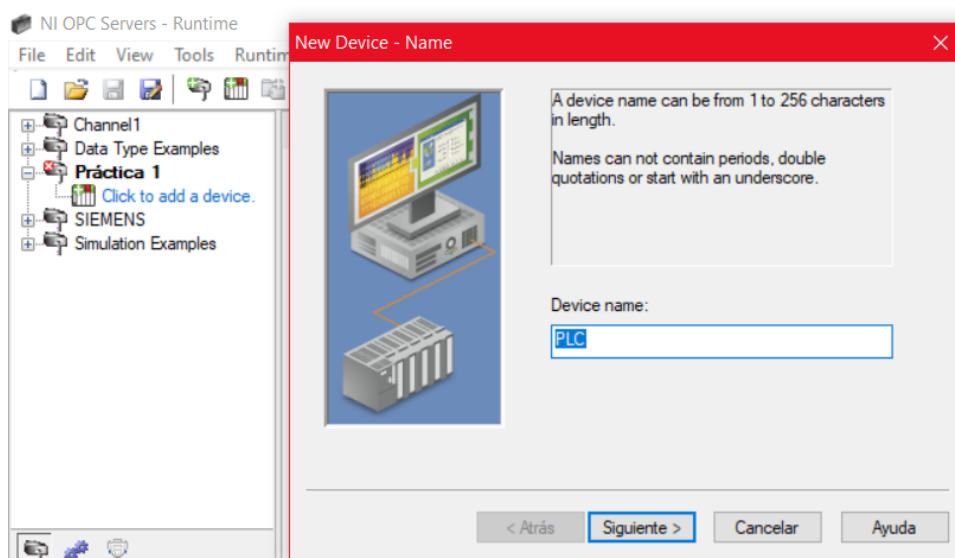


Figura 100. Ventana para nombrar el nuevo equipo en OPS server

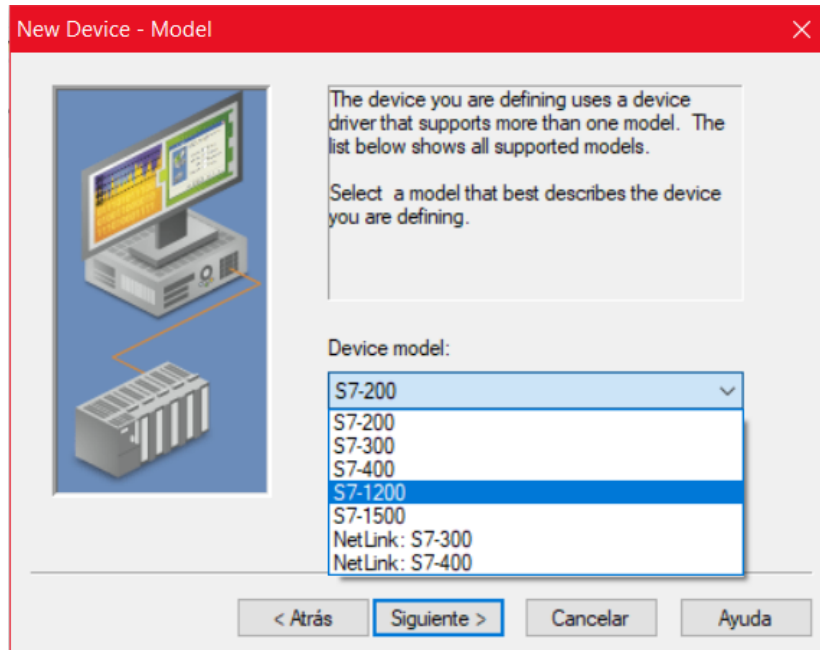


Figura 101. Selección de modelo de PLC

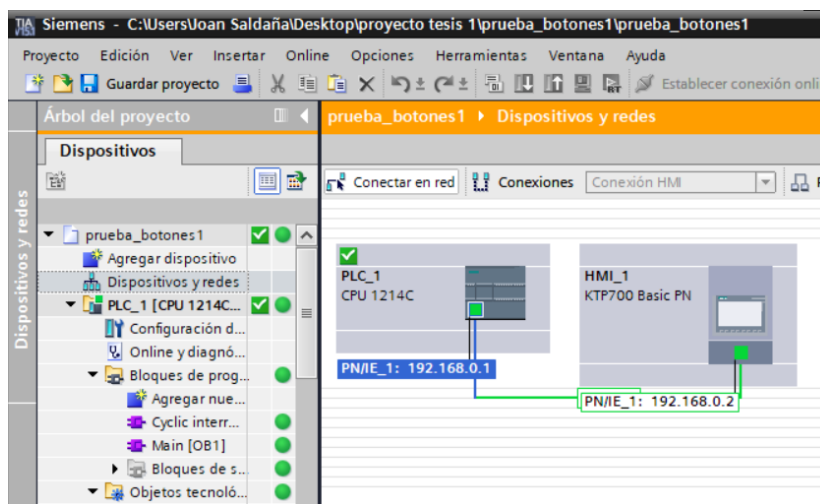


Figura 102. vista de la IP del PLC desde TIA Portal

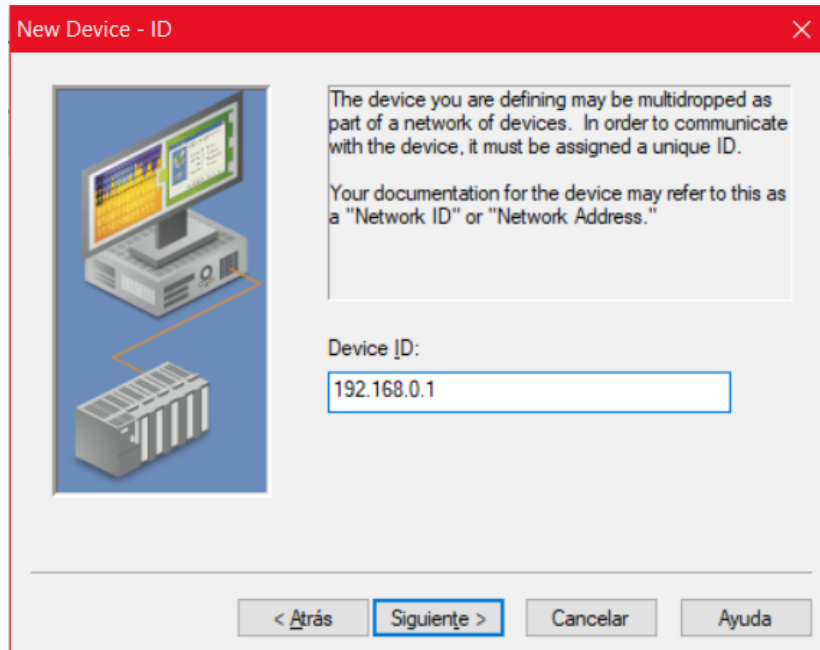


Figura 103. Ingreso del IP en el OPC Server

Luego, aparecerán una serie de ventanas las cuales no se les debe cambiar los parámetros, pues sus configuraciones predeterminadas son suficientes para establecer la correcta comunicación con el PLC. Desde la figura 104 hasta la figura 110 se muestran las ventanas.

Al finalizar aparecerá la ventana mostrada en la figura 111, donde se muestran todas las configuraciones del nuevo dispositivo creado.

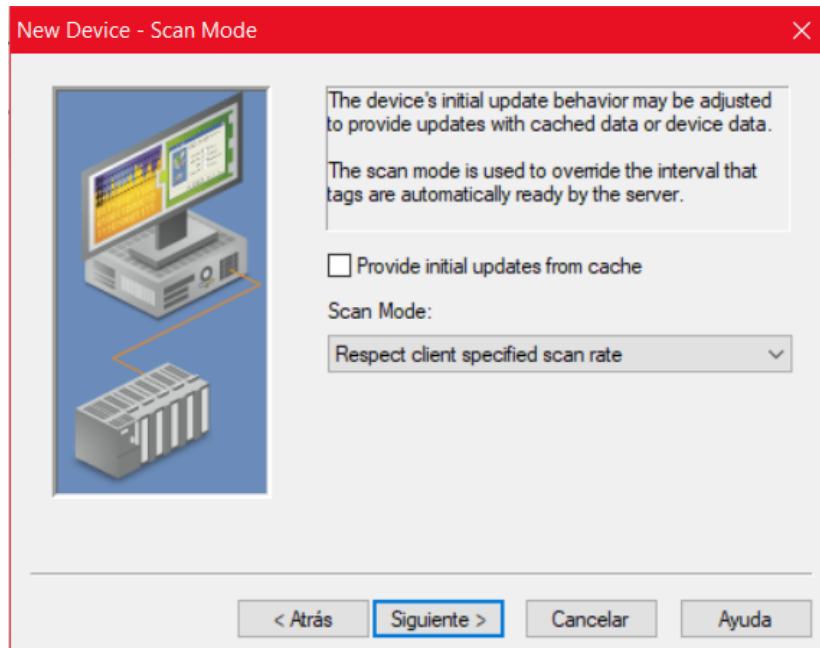


Figura 104. Modo de escaneo del dispositivo

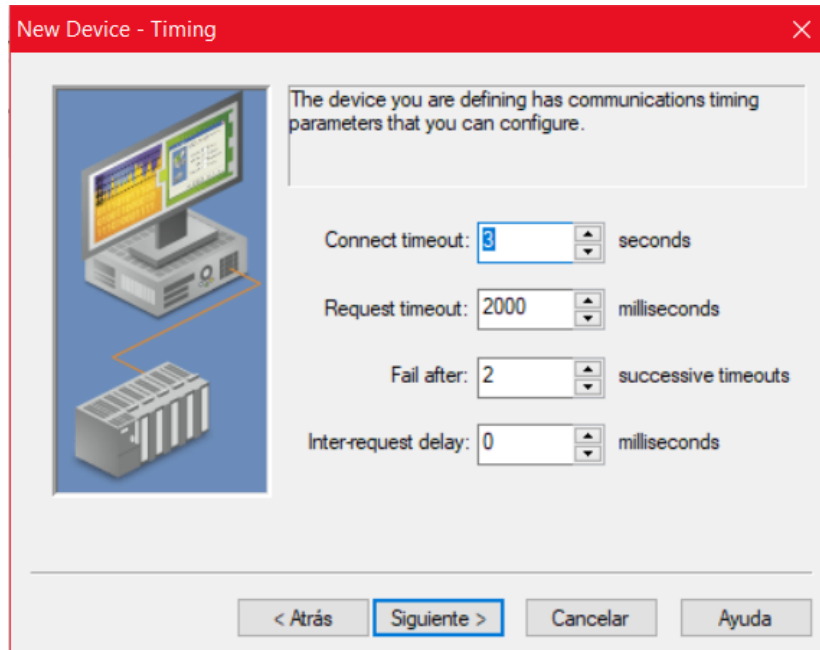


Figura 105. Tiempo de comunicación del dispositivo

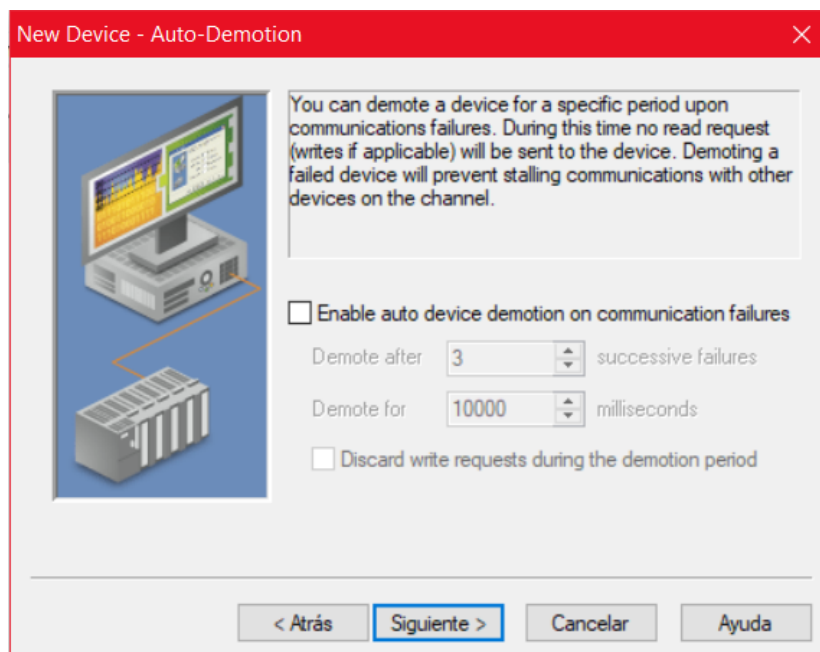


Figura 106. Auto Demotion del dispositivo

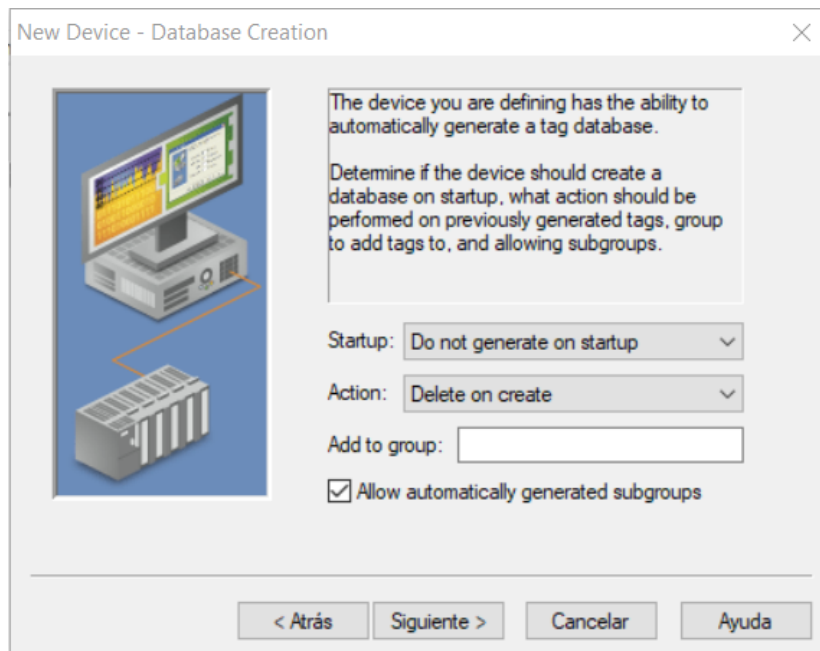


Figura 107. Crear base de datos para el dispositivo

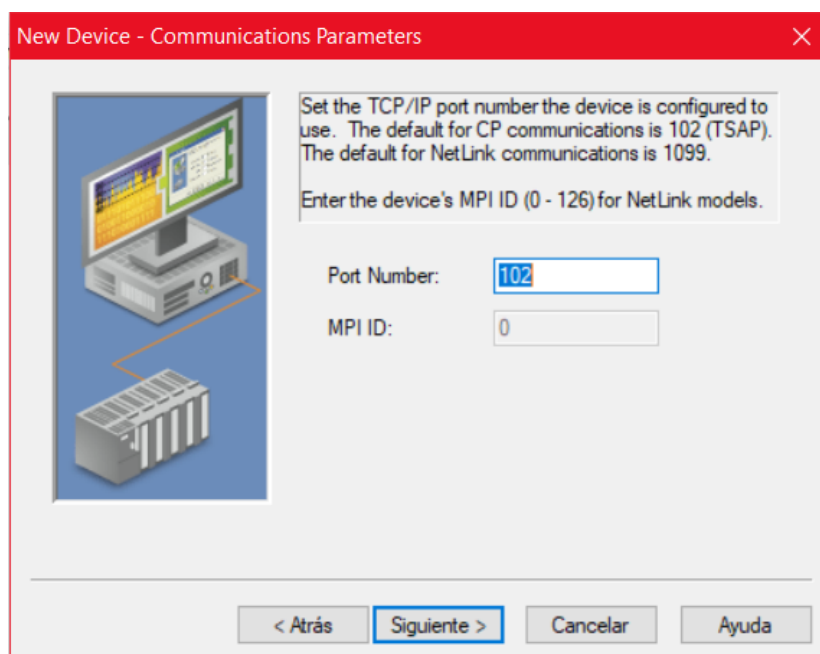


Figura 108. Numero de puerto para la comunicación

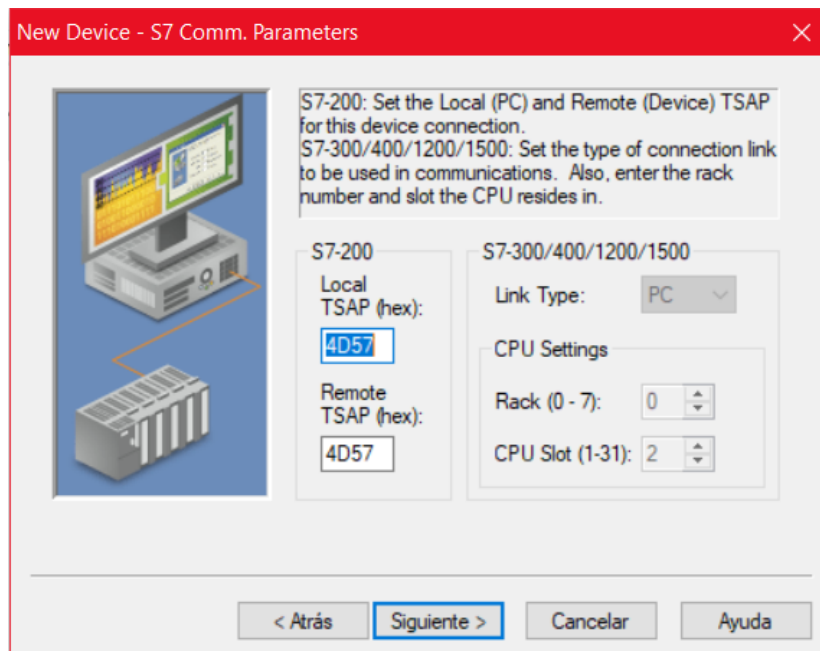


Figura 109. Parámetros comunes del dispositivo

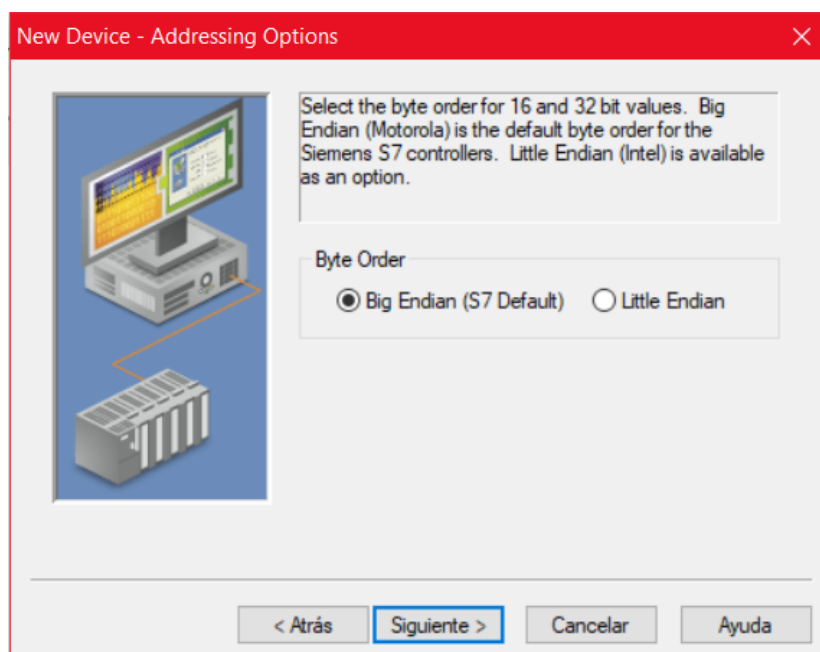


Figura 110. Opciones de dirección del dispositivo

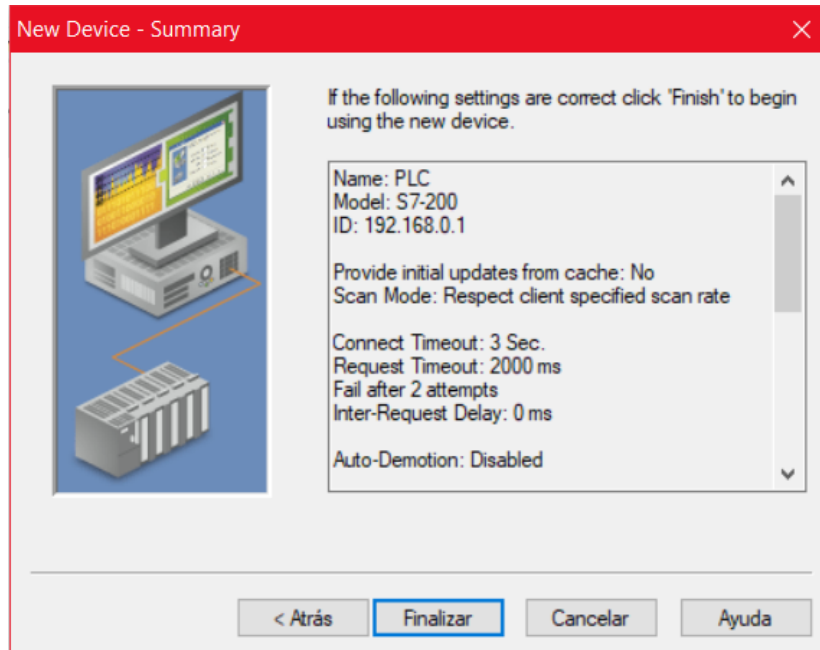


Figura 111. Ventana de Resumen de la configuración del dispositivo

Ahora se agregarán las marcas con las que trabajará la programación de LabVIEW. Primero para crear las marcas en el OPC Server estas deben existir dentro de los segmentos de programación del TIA Portal. Luego como se muestra en la figura 112 dando clic derecho sobre la pantalla, aparecerá la opción para agregar marcas. Lo siguiente será introducir un nombre a la marca, no necesariamente tiene que ser la mismo colocado en TIA Portal, pero se hace énfasis que la identificación si debe ser la misma. en la figura 113 se muestra un ejemplo. no obstante el programa automáticamente identificará el tipo de dato que contiene la variable.

Este proceso se debe realizar para cada variable que se necesita controlar en el TIA Portal. Al finalizar se guarda la tabla creada en la misma carpeta donde se tiene el programa del PLC.

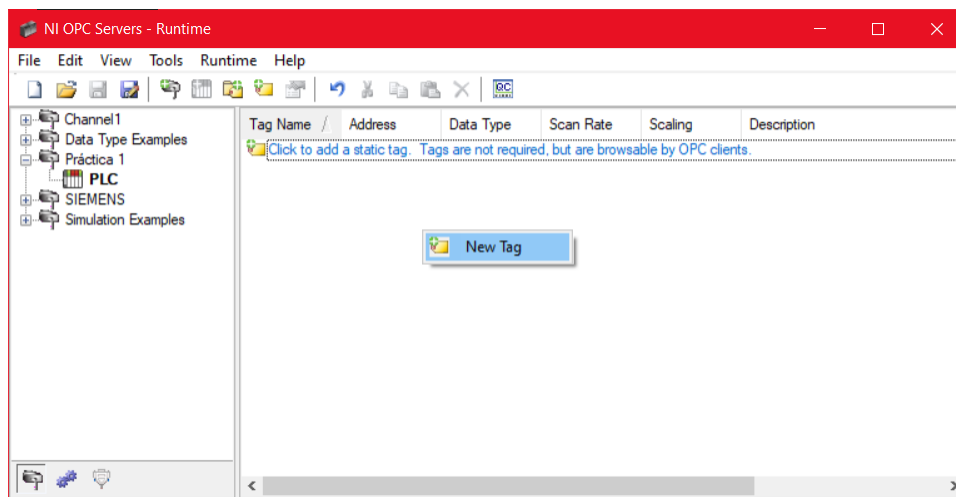


Figura 112. Entorno de OPC Server para agregar marcas

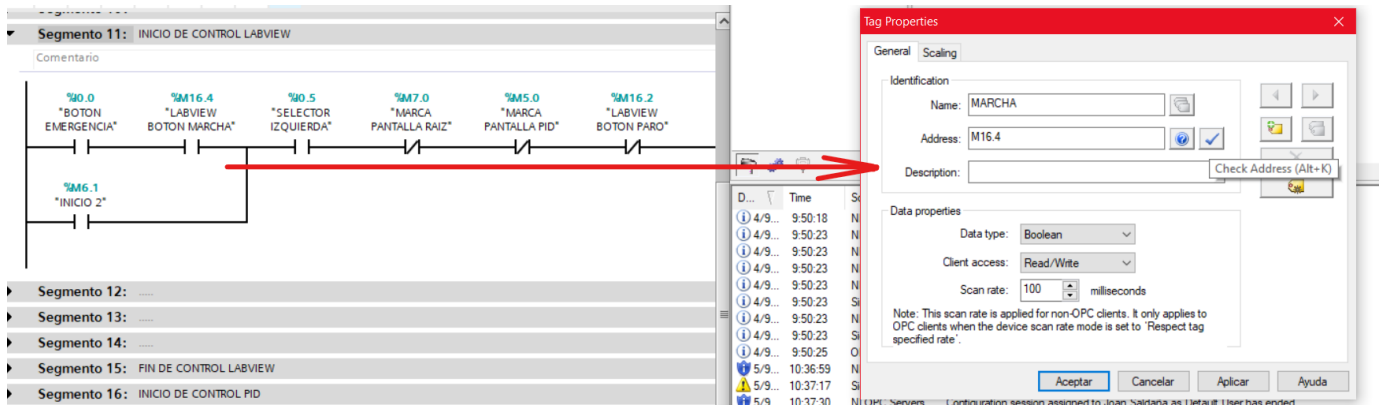


Figura 113. Ventana para agregar las marcas de TIA Portal al OPC Server

Con la tabla de datos creadas, se debe abrir un nuevo proyecto en el software de LabVIEW como se muestra en la figura 114. Al dar clic en “Crear Proyecto” se abrirá una ventana para la selección del tipo de proyecto a implementar, como se muestra en la figura 115, y se elige un proyecto blanco.

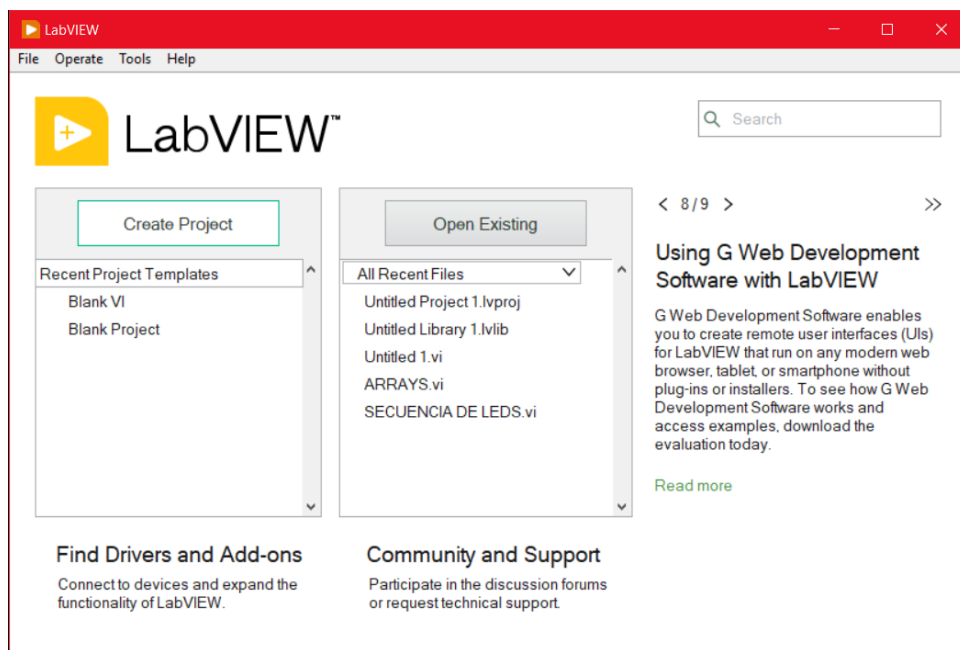


Figura 114. Ventana para crear proyectos LabVIEW

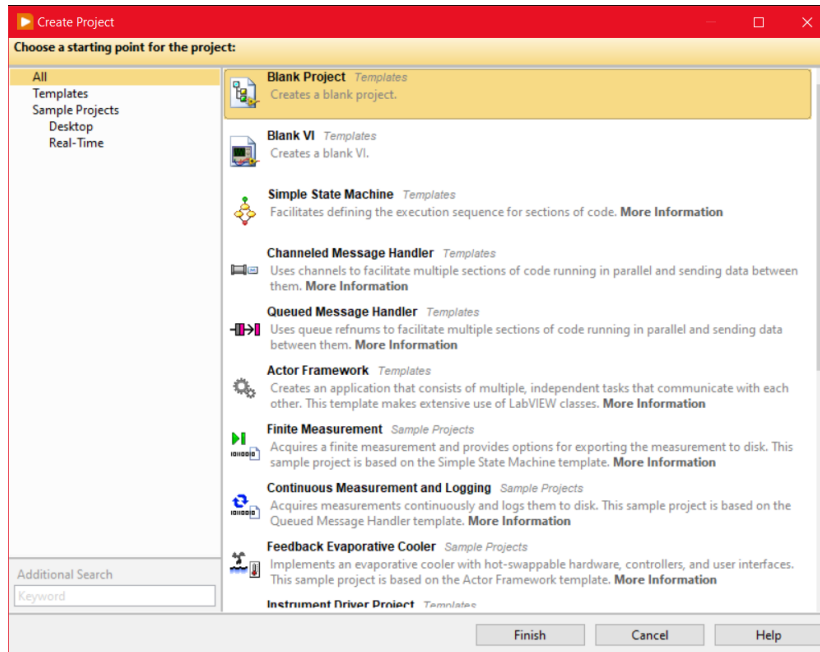


Figura 115. Ventana de selección de proyectos de LabVIEW

Aparecerá una nueva ventana llamada “Explorador de proyecto”, allí se se agregarán las marcas creadas en el OPC Server, realizando los pasos mostrado en las siguientes figuras.

Primero se creará un servicio de entrada y salida, como se muestra en la figura 116, continua con la selección del cliente OPC, como se muestra en la figura 117. siguiendo con la selección del servidor estableciendo un tiempo de comunicación de 100 *ms* como se muestra en la figura 118 y aceptando la ventana emergente como se muestra en la figura 119.

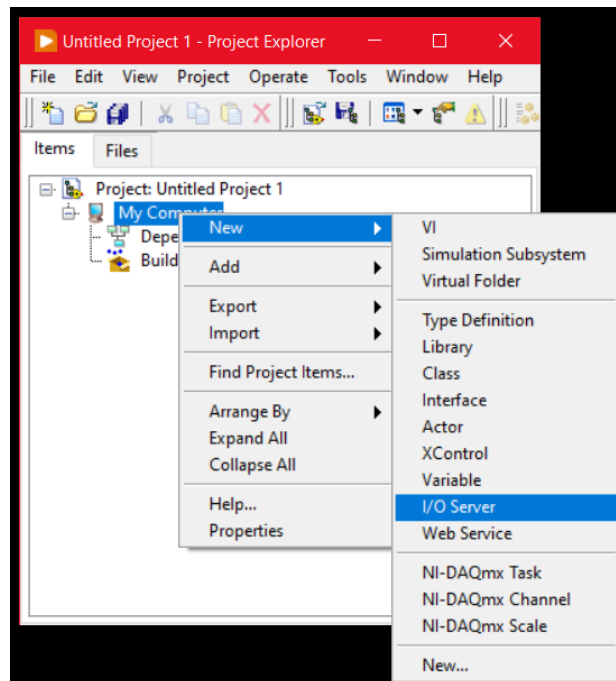


Figura 116. Ventana para crear el servicio de entrada y salida en LabVIEW

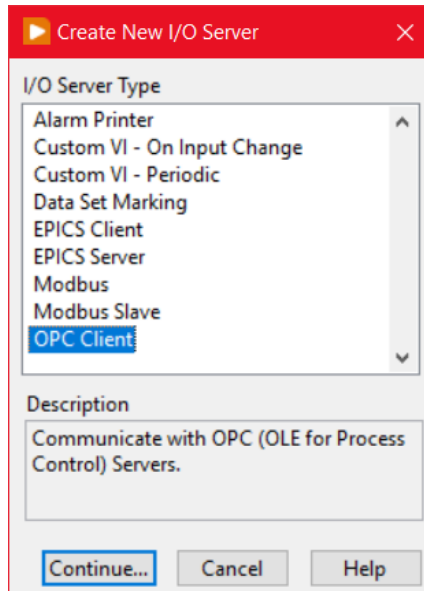


Figura 117. Selección del cliente OPC

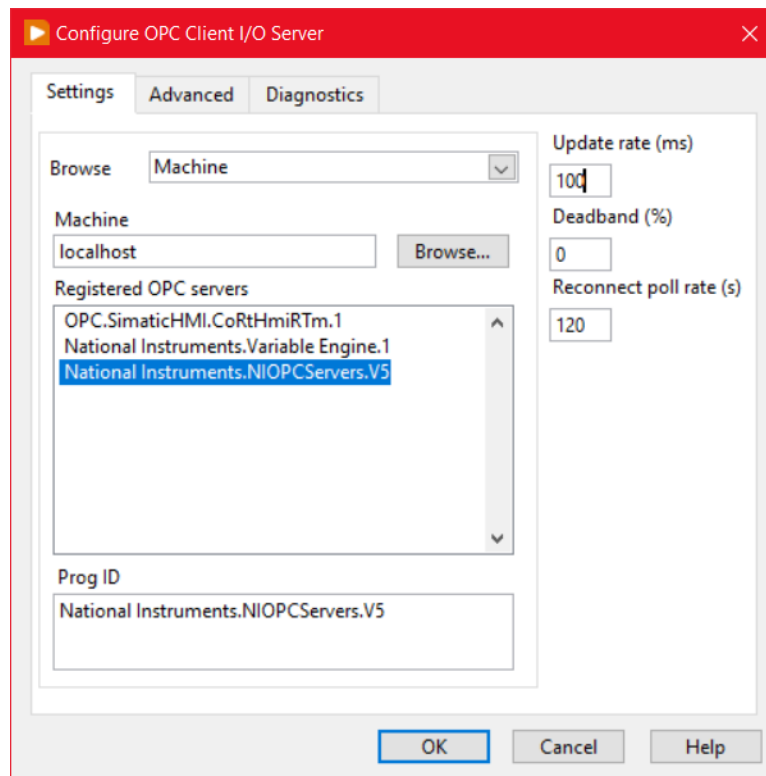


Figura 118. Ventana de selección para el servidor de comunicación

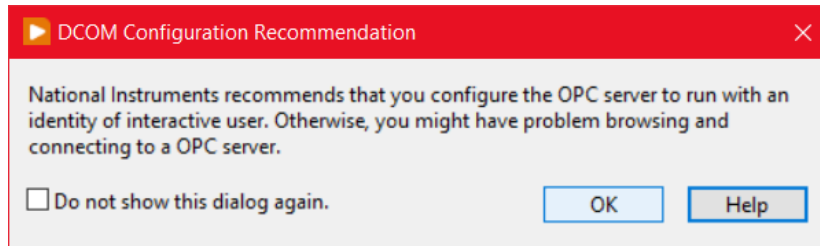


Figura 119. Ventana emergente de recomendación

Casi para finalizar, con el servicio creado, es indispensable agregar las marcas que estarán involucradas en la comunicación. En el explorador de proyectos, se debe hacer clic derecho en el servicio creado, como se muestra en la figura 120.

Al seleccionar “Create Bound Variable”, aparecerá la ventana para agregar las marcas y convertirlas en variables, tal como se muestra en la figura 121.

En esta ventana, en el explorador de proyectos que se visualiza en la parte izquierda, se debe ingresar en todas las subcarpetas necesarias del OPC Server para llegar a las marcas. Primero, se debe buscar la carpeta con el nombre del canal y luego la carpeta con el nombre del dispositivo. Allí se encontrarán las marcas que se requieren transformar, luego se da clic en “.Agregar”. Al final se obtiene el resultado mostrado en la figura 122.

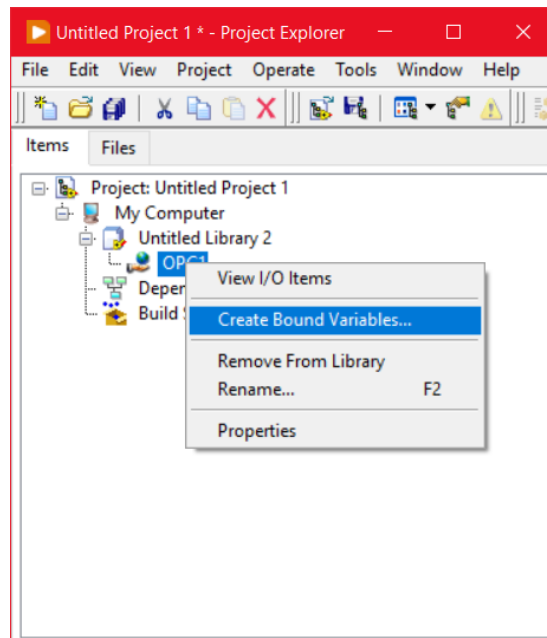


Figura 120. Crear variables para las marcas del OPC Server

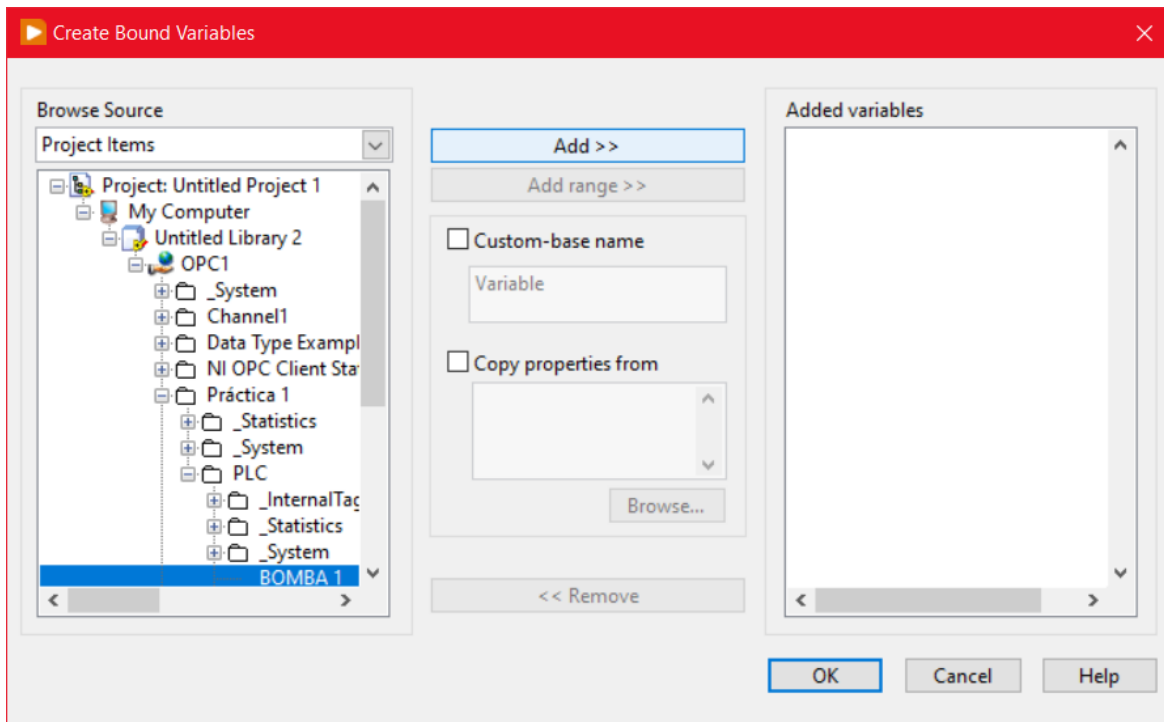


Figura 121. Ventana para la creación de variables a partir de las marcas del OPC Server

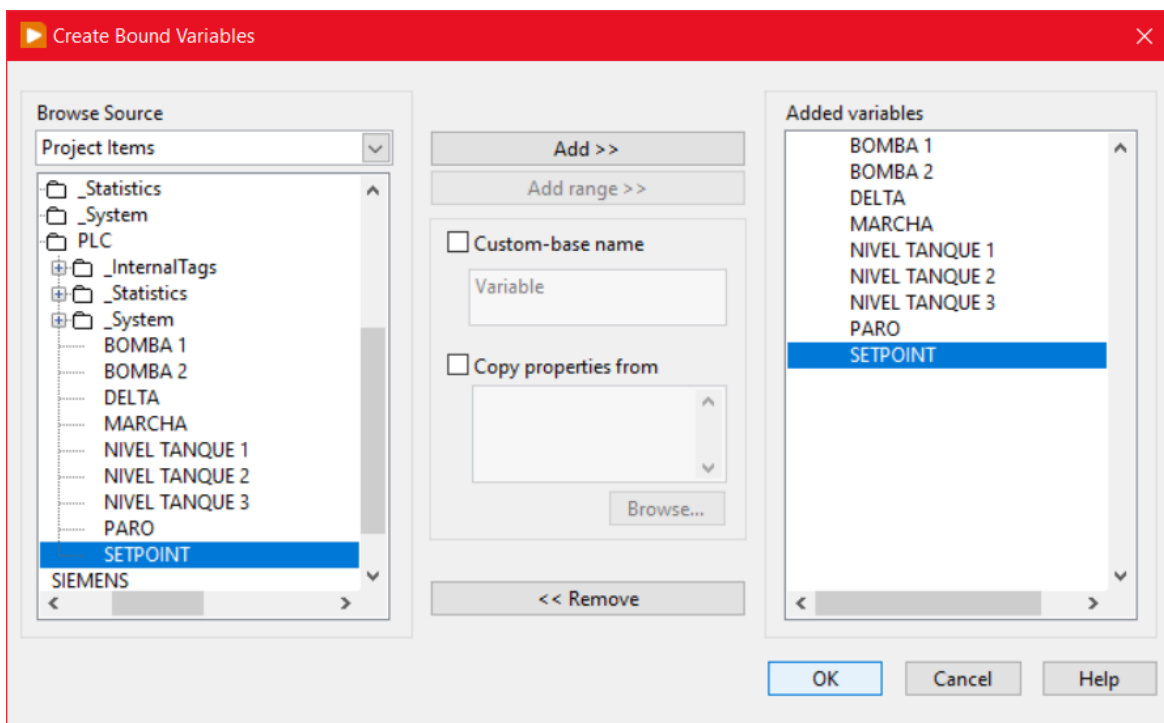


Figura 122. Resultado final luego de agregar todas las marcas

Por último, con todas las marcas transformadas en variables, se puede crear un nuevo proyecto VI, como se muestra en la figura 123. Con esto, se concluye arrastrando todas las variables hacia el entorno de programación de LabVIEW, como se muestra en la figura 124, obteniendo el resultado que se muestra en la figura 125, donde se presentan todas las variables listas para ser utilizadas en cualquier programación.

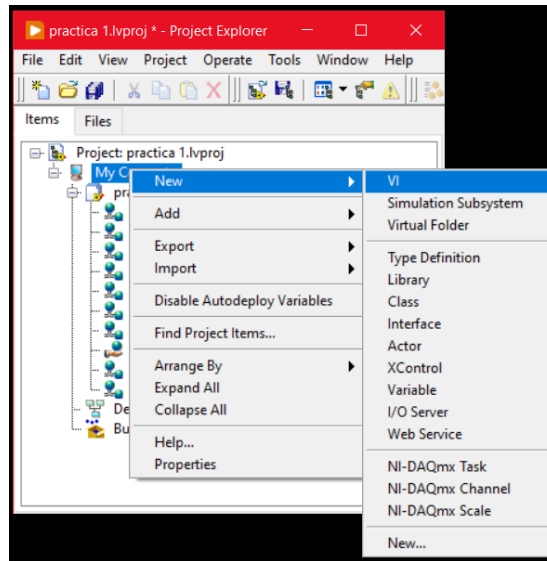


Figura 123. Creación de proyecto VI desde el explorador

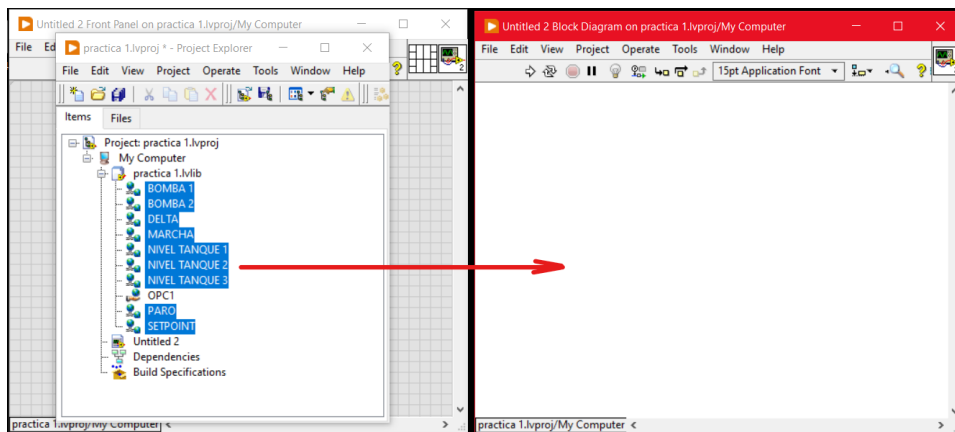


Figura 124. Movimiento de variables hacia el entorno de programación de LabVIEW

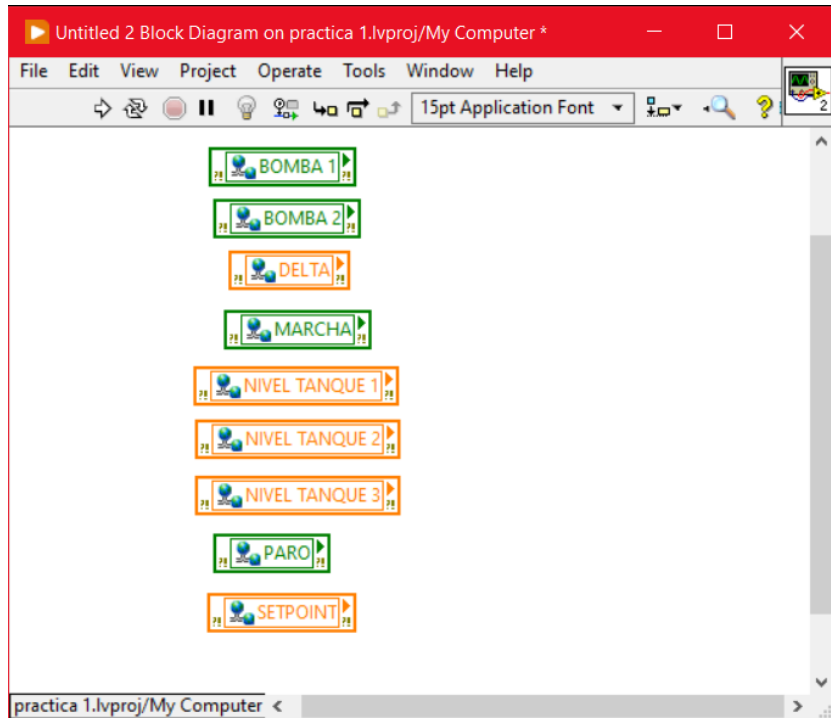


Figura 125. Variables listas para programar

APÉNDICE E PROGRAMACIÓN DEL CONTROL POR HISTÉRESIS

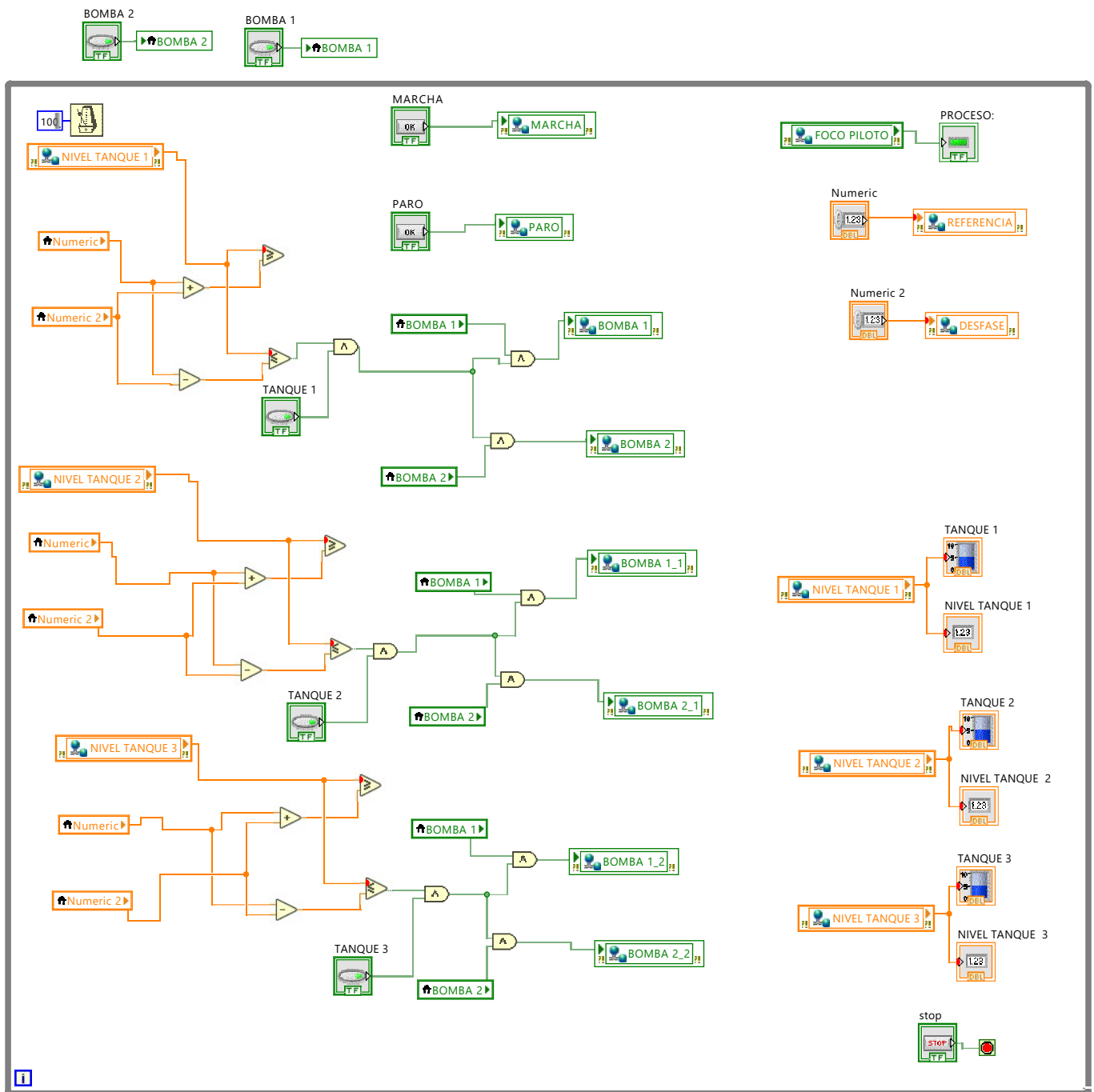


Figura 126. Programación en LabVIEW

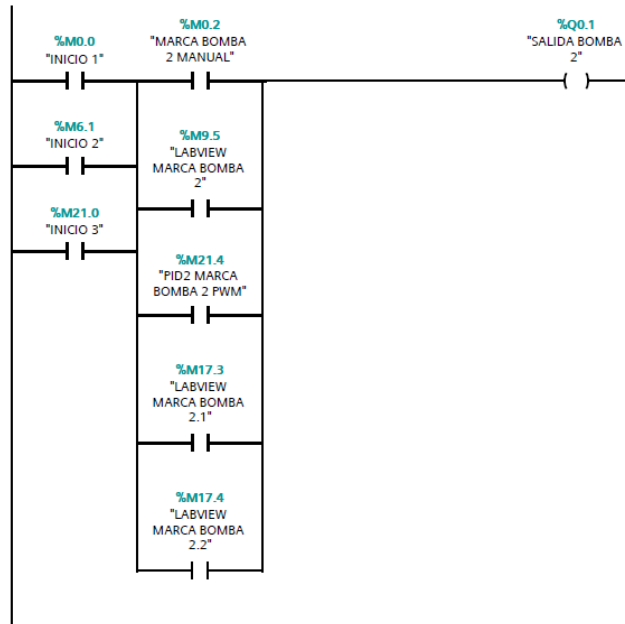


Figura 127. Segmento de marcas para controlar bomba 2 desde LabVIEW

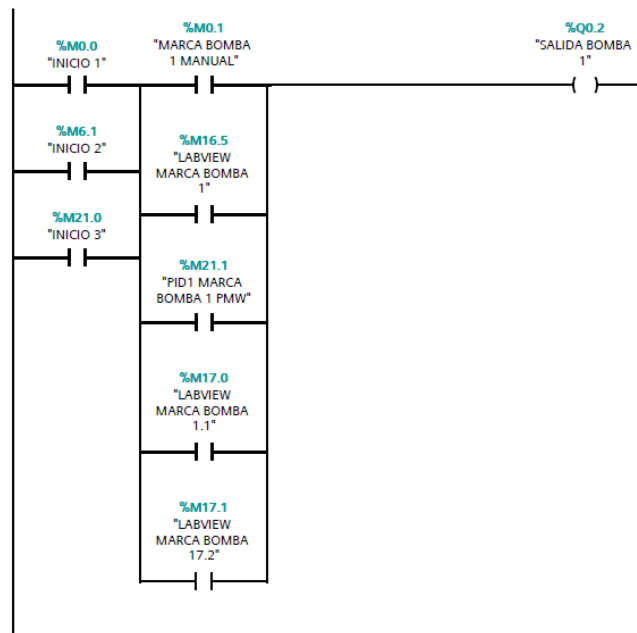


Figura 128. Segmento de marcas para controlar bomba 1 desde LabVIEW

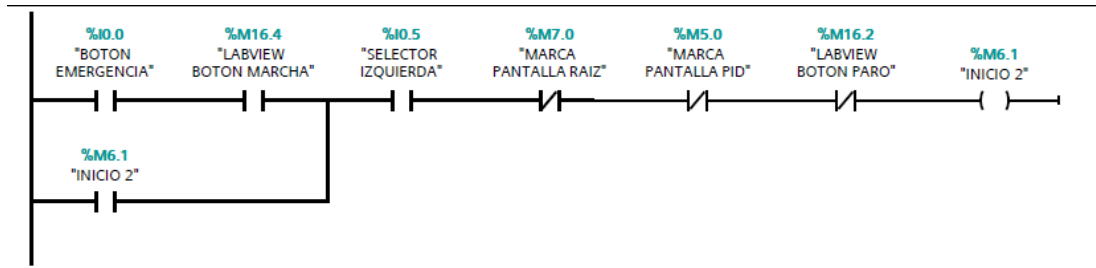


Figura 129. Segmento para iniciar el programa de control por histéresis

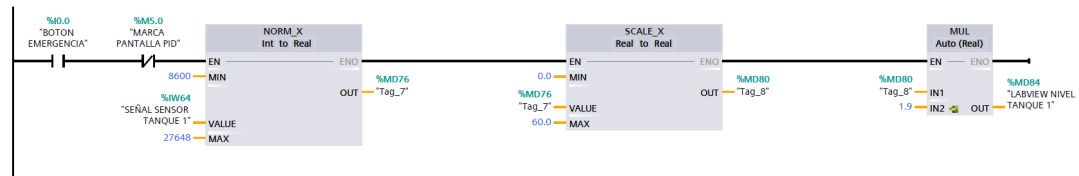


Figura 130. Segmento para tratar la señal del sensor del tanque 1 para LabVIEW

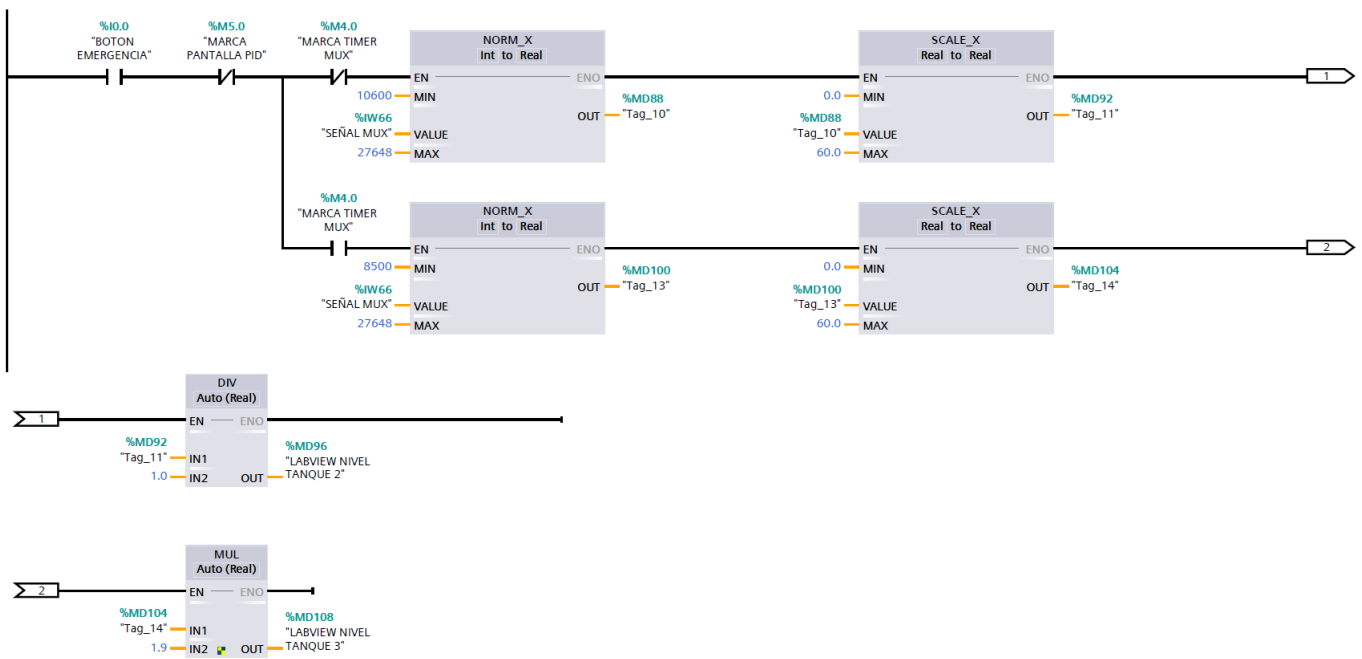


Figura 131. Segmento para tratar la señal del sensor del tanque 2 y 3 para LabVIEW