

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Integración MATLAB/Simulink para identificación y control multivariable  
de una planta de fluidos didáctica”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Nombre de la titulación**

**Ingeniero en Electrónica y Automatización**

Presentado por:

Daniel Andrés Carrasco Muñoz

Marco Ramses Orna Cedeño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

## DEDICATORIA

El presente proyecto integrador está dedicado, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la constancia y la guía necesarias para culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mis padres, Edith y Hugo, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas, su esfuerzo constante y por ser el pilar fundamental en cada uno de mis logros.

A mi hermana Dulce, a mi novia Dariana, a mis abuelas Rosaura y Libertad, a quienes agradezco profundamente su apoyo, comprensión y motivación constante, los cuales han sido fundamentales para que pueda salir adelante y alcanzar los objetivos propuestos a lo largo de mi formación académica.

Finalmente, este trabajo está dedicado a mi mascota Kira.

-Daniel Andrés Carrasco Muñoz

## DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado principalmente a mis queridos padres: Marlon Ramses Orna Montes y María Monserrate Cedeño Cedeño, que siempre me impulsan a ser mejor persona y a nunca rendirme a pesar de todas las adversidades que me encuentro día a día.

A mi querido grupo de amigos que siempre estuvieron ahí dándome ánimos cuando no tenía de donde sacar fuerzas.

Finalmente, a mi querida mascota Brando que siempre estuvo conmigo acompañándome en los momentos duros y que, a pesar de que ya no esté aquí conmigo, sigue dándome fuerzas para seguir adelante.

Con mucha gratitud,

-Marco Ramses Orna Cedeño

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres, Edith y Hugo, por el respaldo y la comprensión brindados durante mi formación universitaria, los cuales fueron fundamentales para culminar esta etapa académica.

Expreso mi agradecimiento a los profesores de la carrera, en especial al profesor Efrén Herrera y al tutor Carlos Salazar, por los conocimientos y la orientación aportados a lo largo de mi proceso formativo.

Agradezco también a mi novia Dariana por su apoyo constante y motivación.

Finalmente, agradezco a mis amigos Edison, Enrique, David, William y Daniel por su compañerismo y apoyo durante este camino académico.

-Daniel Andrés Carrasco Muñoz

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más grande gratitud a mis padres, Marlon Ramses Orna Montes y María Monserrate Cedeño Cedeño, los cuales día a día me impulsan a seguir adelante para poder terminar este importante tramo de mi vida.

A mis compañeros y profesores de toda la carrera, los cuales me han ayudado a convertirme en mejor persona en el ámbito profesional y personal.

A todos mis familiares más cercanos, especialmente a mi abuelo Marco que siempre está apoyándome, y a mis abuelas Magaly y Raquel que me siguen cuidando a pesar de que ya no estén aquí conmigo.

A mis amigos más cercanos que siempre estuvieron presentes para ayudarme con lo que necesitara.

Con mucha gratitud,

-Marco Ramses Orna Cedeño

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Daniel Andrés Carrasco Muñoz* y *Marco Ramses Orna Cedeño* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Carrasco', with a stylized, cursive script.

Daniel Carrasco

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marco Orna', with a stylized, cursive script and a horizontal line underneath.

Marco Orna

# EVALUADORES

.....  
**Efrén Vinicio Herrera Muentes**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**Carlos Alberto Salazar López**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto es actualizar una planta de fluidos con nuevos sensores y actuadores para poder comunicarse con MATLAB. Este nuevo diseño busca reemplazar totalmente al anterior, cuyo problema principal es la imposibilidad de comunicación con MATLAB y eso hace que no sea posible usarla en prácticas experimentales. La nueva planta beneficiará a los estudiantes debido a que podrán poner en práctica sus nuevos conocimientos en un entorno práctico.

Para llevar a cabo este proyecto se utilizó el microcontrolador ESP-32 junto a nuevos sensores de presión y actuadores, como lo es la válvula proporcional. Se implementó un protocolo de Comunicación Serial optimizado para el envío y recibo de datos al mismo tiempo.

Los resultados mostraron una comunicación bidireccional muy estable entre el microcontrolador y MATLAB, pudiendo obtener las gráficas del nivel de cada uno de los tanques. De la misma manera se validó la respuesta operativa por parte de los componentes electrónicos al momento de recibir una orden por parte de MATLAB.

Se pudo concluir que la planta actualizada constituye una nueva plataforma experimental donde se puede realizar el análisis de procesos en tiempo real.

**Palabras Clave:** ESP-32, Comunicación, Nivel, MATLAB, Procesos

## **ABSTRACT**

*This project aims to upgrade a fluid handling plant with new sensors and actuators to enable communication with MATLAB. This new design seeks to completely replace the previous one, whose main problem was its inability to communicate with MATLAB, rendering it unusable for experimental applications. The new plant will benefit students by allowing them to apply new knowledge in this type of environment.*

*To carry out this project, the ESP-32 microcontroller was used along with new pressure sensors and actuators, such as a proportional valve. An optimized serial communication protocol was implemented for the simultaneous sending and receiving of data.*

*The results showed very stable bidirectional communication between the microcontroller and MATLAB, enabling the generation of level graphs for each tank. The operational response of the electronic components to commands from MATLAB was also validated.*

*It was concluded that the upgraded plant constitutes a new experimental platform for real-time process analysis.*

*Keywords: ESP-32, Communication, Level, MATLAB, Process*

## ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	7
RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1 .....	13
1.    Introducción .....	13
1.1    Descripción del problema .....	13
1.2    Justificación del problema .....	14
1.3    Objetivos .....	14
1.3.1    Objetivo General .....	14
1.3.2    Objetivos Específicos.....	15
1.4    Marco teórico.....	15
1.4.1    Automatización y Control de Procesos Industriales.....	15
1.4.2    Planta de Nivel de Fluidos.....	17
1.4.3    Sistemas de Comunicaciones Industriales .....	20
1.4.4    MATLAB y Simulink .....	22
1.4.5    Microcontroladores.....	23
CAPÍTULO 2 .....	26
2.    Metodología.....	26

2.1	Selección de Componentes .....	26
2.2	Caracterización y levantamiento de la arquitectura física .....	27
2.2.1	Criterios de diseño .....	28
2.2.2	Configuración de los tanques .....	29
2.2.3	Diseño del reservorio .....	30
2.2.4	Materiales y estructura .....	30
2.2.5	Integración mecánica-hidráulica .....	36
2.2.6	Instrumentación y actuadores .....	39
2.3	Dimensionamiento eléctrico.....	42
2.3.1	Fuente de Voltaje 12VDC.....	42
2.3.2	ESP-32 .....	42
2.3.3	Bomba de Agua .....	43
2.3.4	Sensor Industrial de Presión XK-131 .....	44
2.3.5	Sensor de Presión MPXV7002DP .....	45
2.3.6	Electroválvulas de 12VDC.....	46
2.3.7	Válvula Proporcional .....	47
2.3.8	Convertidor Voltaje a Corriente XF0136-02.....	48
2.3.9	Convertidor Corriente a Voltaje HW-685 .....	48
2.3.10	Módulo Rele HW-316.....	49
2.3.11	Módulo IRF520 .....	50
2.4	Diseño del sistema de adquisición y acondicionamiento de señales .....	51
2.5	Integración del microcontrolador ESP-32 con MATLAB/Simulink mediante Comunicación Serial.....	52
2.5.1	Arquitectura de Comunicación .....	52
2.5.2	Configuración de la Comunicación Serial entre ESP-32 y MATLAB/Simulink .....	53

2.5.3	Funcionamiento de la Comunicación Serial entre ESP-32 y MATLAB/Simulink .....	55
CAPÍTULO 3 .....		57
3.	Resultados Y ANÁLISIS.....	57
3.1	Estabilidad del Protocolo Serial .....	57
3.2	Calibración de los Sensores de Nivel .....	57
3.2.1	Calibración de los sensores del Tanque 1 y Tanque 2 .....	58
3.2.2	Calibración de los sensores del Tanque 3 y Tanque 4 .....	59
3.3	Caracterización de los Actuadores .....	59
3.3.1	Respuesta de la Bomba de Agua.....	60
3.3.2	Respuesta de la Válvula Proporcional.....	60
3.3.3	Respuesta de las Electroválvulas.....	61
3.4	Dinámica del Sistema (Curvas de Reacción).....	62
3.4.1	Comportamiento del nivel en el Tanque 1 .....	62
3.4.2	Comportamiento del nivel en el Tanque 2 .....	63
3.4.3	Comportamiento del nivel en el Tanque 3 .....	65
3.4.4	Comportamiento del nivel en el Tanque 4 .....	66
CAPÍTULO 4 .....		68
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	68
4.1	Conclusiones .....	68
4.2	Recomendaciones .....	68
BIBLIOGRAFÍA .....		70
ANEXOS .....		73

## ABREVIATURAS

PLC	Controlador Lógico Programable
CNC	Control Numérico Computarizado
UART	Transmisor/Receptor Asíncrono Universal
ADC	Convertidor Analógico a Digital
DAC	Convertidor Digital a Analógico
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
USB	Bus Serial Universal
CDC	Clase de Dispositivo de Comunicación
TX	Transmisión
RX	Recepción
I/O	Entradas/Salidas
CNC	Control Numérico Computarizado
CAD	Diseño Asistido por Computador
CPU	Unidad de Procesamiento Central
PMMA	Polimetil Metacrilato
MPC	Control Predictivo basado en Modelo
OPC	Comunicaciones de Plataforma Abierta
UA	Arquitectura Unificada
MQTT	Protocolo de Transporte de Telemetría por Colas de Mensajes
TCP	Protocolo de Control de Transmisión
IP	Protocolo de Internet
LSB	Bit Menos Significativo
MSB	Bit Mas Significativo
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio
ROM	Memoria de Solo Lectura
SoC	Sistema en un Chip
I2C	Interconexión de Circuitos Integrados
I2S	Interfaz de Sonido entre Circuitos Integrados
SAR	Registro de Aproximación Sucesiva

MAC	Control de Acceso Medio
DMA	Acceso Directo a Memoria
CAN	Red de Área de Controladores
NC	Normalmente Cerrado
NO	Normalmente Abierto
COM	Puerto de Comunicación
TTL	Lógica Transistor-Transistor

## SIMBOLOGÍA

V	Voltios
A	Amperios
Pa	Pascales
kPa	Kilopascales
MPa	Megapascales
mV	Milivoltio
mA	Miliamperio
mm	Milimetro
m	Metro
L	Litro
ms	Milisegundos
W	Vatios
VDC	Voltios de Corriente Continua

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tanque con control de Nivel .....	18
Figura 1.2 Pines de la ESP-32.....	24
Figura 2.1 Diagrama de bloques para fabricación de planta de nivel.....	26
Figura 2.2 Diagrama de bloques para comunicación entre ESP-32 y Matlab .....	26
Figura 2.3 Diagrama P&ID de la planta .....	27
Figura 2.4 Diseño de la planta en Inventor .....	29
Figura 2.5 Análisis de esfuerzo de Von Mises de la estructura metálica de la planta	32
Figura 2.6 Análisis de factor de seguridad de la estructura metálica de la planta .....	32
Figura 2.7 Diseño de las piezas utilizadas en cada tanque.....	33
Figura 2.8 Ensamble de tanques de acrílico .....	34
Figura 2.9 Pruebas de estanqueidad de tanques de acrílico .....	35
Figura 2.10 Tanques de acrílico luego de las pruebas.....	35
Figura 2.11 Acoples pasatanques incorporados al sistema .....	36
Figura 2.12 Pruebas con acoples rápidos.....	37
Figura 2.13 Reducciones instaladas en sensores industriales .....	37
Figura 2.14 Reducciones instaladas en válvulas proporcionales .....	38
Figura 2.15 Reservorio con mangueras de succión y descarga instaladas.....	39
Figura 2.16 Estado final de la planta de nivel (vista frontal).....	40
Figura 2.17 Estado final de la planta de nivel (vistas laterales).....	41
Figura 2.18 Fuente de 12 VDC .....	42
Figura 2.19 Bomba de Agua.....	43
Figura 2.20 Sensor de Presión Industrial XK-131 .....	44
Figura 2.21 Sensor de Presión MPXV7002DP .....	45
Figura 2.22 Electroválvula de 12 VDC .....	46
Figura 2.23 Válvula Proporcional.....	47
Figura 2.24 Convertidor XF0136-02 .....	48
Figura 2.25 Convertidor HW-685 .....	49
Figura 2.26 Módulo HW-316.....	49
Figura 2.27 Módulo IRF520 .....	50

Figura 2.28 Parámetros de Serial Configuration .....	53
Figura 2.29 Parámetros de Serial Receive .....	54
Figura 2.30 Parámetros de Serial Send .....	54
Figura 2.31 Operación matemática aplicada en Simulink .....	56
Figura 3.1 Función leerPromedio.....	57
Figura 3.2 Ecuación de altura del Tanque 1 .....	58
Figura 3.3 Ecuación de altura del Tanque 2 .....	59
Figura 3.4 Ecuación de altura de los tanques 3 y 4 .....	59
Figura 3.5 Configuración PWM.....	60
Figura 3.6 Envío de datos para manipular Bomba de Agua.....	60
Figura 3.7 Envío de datos para manipular Válvula Proporcional.....	61
Figura 3.8 Código en la ESP-32 para las electroválvulas .....	61
Figura 3.9 Envío de datos para manipular las electroválvulas .....	62
Figura 3.10 Llenado del Tanque 1 .....	62
Figura 3.11 Vaciado del Tanque 1.....	63
Figura 3.12 Llenado del Tanque 2 .....	63
Figura 3.13 Vaciado del Tanque 2.....	64
Figura 3.14 Llenado del Tanque 3 .....	65
Figura 3.15 Vaciado del Tanque 3.....	65
Figura 3.16 Llenado del Tanque 4 .....	66
Figura 3.17 Vaciado del Tanque 4.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Listado de Componentes .....	27
Tabla 2.2 Resistencia mecánica de las uniones utilizando Weld-On 3.....	34
Tabla 2.3 Mapa de Entradas y Salidas .....	41
Tabla 2.4 Ficha técnica de la Fuente 12 VDC.....	42
Tabla 2.5 Características de la Bomba de Agua .....	43
Tabla 2.6 Datos Técnicos del Sensor de Presión Industrial .....	44
Tabla 2.7 Ficha técnica del MPXV7002DP .....	45
Tabla 2.8 Ficha técnica de la Electroválvula .....	46
Tabla 2.9 Datos Técnicos de la Válvula Proporcional .....	47
Tabla 2.10 Datos Técnicos del Convertidor XF0136-02.....	48
Tabla 2.11 Datos Técnicos del Convertidor HW-685 .....	49
Tabla 2.12 Datos Técnicos del Módulo HW-316 .....	50
Tabla 2.13 Datos Técnicos del Módulo IRF520 .....	50
Tabla 2.14 Paquete de Datos para la Transmisión .....	55
Tabla 2.15 Paquete de Datos para la transmisión .....	56

## **ÍNDICE DE PLANOS**

PLANO 1 Plano P&ID de la planta de nivel

PLANO 2 Plano eléctrico de la planta de nivel

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación se centra en el rediseño y modernización de una planta de fluidos didáctica, con el objetivo de fortalecer el aprendizaje práctico en el área de automatización y control. La iniciativa busca implementar reservorios de agua y establecer una comunicación directa con MATLAB/Simulink para la adquisición y análisis de datos en tiempo real, superando las limitaciones actuales del laboratorio. A través del desarrollo de este prototipo, se pretende no solo aplicar los principios teóricos de la mecánica de fluidos y del control automático, sino también explorar soluciones innovadoras en la gestión y supervisión de procesos, optimizando la eficiencia y precisión del sistema. Además, el proyecto permitirá integrar y evaluar estrategias de control tanto clásicas como modernas, demostrando el impacto de la automatización en la mejora del desempeño y la comprensión de los fenómenos físicos asociados al nivel de fluidos.

### 1.1 Descripción del problema

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), específicamente dentro del Laboratorio de Sistemas de Control existe una planta de fluidos didáctica, la cual pretendía ser una herramienta didáctica para la enseñanza de conceptos asociados a la materia de Sistemas de Control. Pero dicha planta actualmente presenta una limitación importante en su capacidad de comunicación con entornos de software como MATLAB, lo que impide la adquisición, procesamiento y análisis de datos en tiempo real para la identificación y control de procesos. Esta carencia restringe la posibilidad de realizar prácticas experimentales avanzadas que integren hardware y software, dificultando la validación de modelos dinámicos, la sintonización de controladores y la automatización de pruebas de desempeño. Como resultado, tanto estudiantes como docentes enfrentan limitaciones en el desarrollo de competencias prácticas relacionadas con la instrumentación, el control de procesos y la comunicación industrial, reduciendo el potencial formativo de la planta dentro del laboratorio de sistemas de control.

Además, la configuración física actual de los reservorios impide la visualización clara de los fenómenos hidráulicos y la comprensión de los principios físicos que ocurren en la planta, para poder realizar un adecuado control de nivel. Por ello, se requiere un rediseño de la planta que contemple la implementación de nuevos tanques y la incorporación de

una interfaz de comunicación funcional con MATLAB/Simulink. Esta actualización permitirá no solo mejorar la experiencia didáctica, sino también fortalecer las prácticas de identificación de sistemas, control multivariable y supervisión de variables en entornos de simulación y experimentación real, contribuyendo así al desarrollo de una formación integral en automatización y control de procesos.

## **1.2 Justificación del problema**

Dentro del Laboratorio de Sistemas de Control ubicado en FIEC existe una planta de nivel, cuyo propósito es mostrarles a los estudiantes el funcionamiento del control automático de procesos mediante practicas experimentales. No obstante, esta planta presenta actualmente problemas relacionados a la comunicación con herramientas de simulación como lo es MATLAB, por lo que no es posible utilizarla didácticamente.

Actualmente, la planta está compuesta por dos tanques, uno de ellos utilizado como reservorio, lo que restringe el análisis de comportamientos más complejos asociados a sistemas multitanque o interconectados. Además, la imposibilidad de establecer comunicación en tiempo real con MATLAB/Simulink limita la observación directa de las variables del proceso, como niveles o caudales, dificultando la comprensión del comportamiento dinámico del sistema.

Estas limitaciones afectan la calidad de la formación práctica de los estudiantes, ya que impiden que puedan analizar en tiempo real la respuesta de la planta ante distintos controladores o condiciones de operación. De este modo, se genera una brecha entre los conocimientos teóricos y su aplicación experimental, reduciendo la capacidad de análisis, interpretación de resultados y desarrollo de habilidades técnicas en el área de control de procesos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Actualizar una planta de fluidos didáctica integrando comunicación con MATLAB/Simulink junto a la implementación de nuevos sensores y actuadores, con el

propósito de fortalecer el aprendizaje práctico en identificación, modelado y control de sistemas dinámicos en el laboratorio de Sistemas de Control.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Implementar la comunicación entre la planta de fluidos y MATLAB/Simulink para la adquisición, procesamiento y análisis de datos en tiempo real.
- ✓ Elaborar una guía de prácticas experimentales que integre los aspectos de instrumentación, control y simulación, orientada al uso académico del sistema rediseñado.
- ✓ Implementar la nueva versión de la planta de nivel de fluidos, integrando los componentes y dispositivos necesarios que posibiliten la comunicación con MATLAB/Simulink para el futuro análisis, modelado y control del sistema en el laboratorio de Sistemas de Control.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Automatización y Control de Procesos Industriales**

#### **1.4.1.1 Instrumentación y sensores industriales**

La instrumentación industrial es esencial para cualquier sistema automatizado, ya que facilita la medición y el monitoreo de las variables del proceso que son cruciales para la operación de una planta, como lo son: presión, nivel, temperatura, caudal y velocidad. Los sensores y transmisores son responsables de detectar estas magnitudes físicas y transformarlas en señales eléctricas estandarizadas, que pueden ser interpretadas posteriormente por un controlador o un sistema de supervisión. Para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos, es vital realizar una selección, instalación y calibración adecuadas de los instrumentos debido a que esto impacta directamente en la eficiencia del proceso productivo (Chokkadi & Bandyopadhyay, 2023).

#### **1.4.1.2 Controladores y estrategias de control**

Los controladores son la parte esencial de un sistema automatizado puesto que reciben la información que envían todos los sensores para poder generar señales que manipulen a los actuadores con el fin de mantener las variables del proceso

dentro de rangos específicos. El controlador más común en la industria es el Controlador Lógico Programable (PLC), por otra parte, los algoritmos de control codificados en microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi y ESP32 suelen ser más aplicados al ámbito educativo (Juneja et al., 2021). Todos estos dispositivos implementan algoritmos de control que van desde sistemas de control secuencial simples hasta sistemas más complejos que permiten mitigar cualquier tipo de perturbación que se presente en el sistema.

Los algoritmos de control son métodos matemáticos utilizados para controlar un proceso industrial, manteniendo las variables a controlar dentro de rangos solicitados. Entre los controladores más conocidos se incluyen los siguientes: PID (Proporcional Integral Derivativo), control modo ON-OFF y control de retroalimentación. En sistemas avanzados, se incluyen modelos como el control adaptativo y control difuso para aumentar la eficiencia general del proceso sin intervención constante del operador (Aboelhassan et al., 2020).

#### **1.4.1.3 Integración de sistemas y comunicación industrial**

La integración de sistemas y la comunicación industrial son aspectos clave para lograr una automatización conectada y eficiente. En las plantas modernas, es necesario que sensores, actuadores, controladores y sistemas de supervisión puedan intercambiar información en tiempo real para coordinar sus operaciones. Este flujo de datos se realiza tradicionalmente mediante redes de campo como PROFINET, Modbus o EtherNet/IP. Por otro lado, en el ámbito educativo también se suele utilizar la comunicación serial para poder transmitir datos en las plantas de uso didáctico.

Sin embargo, la base de casi todas las redes industriales contemporáneas se encuentra en los protocolos TCP/IP. Este conjunto de protocolos determina cómo se transmiten los mensajes a través de las redes para que los datos puedan ser transmitidos de manera confiable desde la fuente hasta el destino. Aunque los protocolos de alto nivel (como OPC UA o MQTT) introducen niveles de abstracción para estandarizar la semántica de los datos, el uso directo de la capa de transporte

TCP/IP a través de Sockets sigue siendo una técnica importante en sistemas embebidos y aplicaciones en tiempo real.

## **1.4.2 Planta de Nivel de Fluidos**

### **1.4.2.1 Definición de una Planta de Nivel de Fluidos**

La planta de nivel de fluido es un sistema físico desarrollado para el análisis, gestión y supervisión del nivel de líquido dentro de uno o varios tanques o contenedores interconectados. Su utilidad es estudiar los cambios de nivel de fluido bajo diversas condiciones operativas para evaluar la dinámica de la respuesta del sistema y el método de control automático para mantener un nivel deseado.

Este tipo de planta consta de equipos hidráulicos, eléctricos y de control, como tanques, bombas, válvulas, sensores de nivel, transmisores de presión, actuadores y controladores programables. La relación entre estos aspectos puede controlar su flujo de entrada y salida de líquido, como un equilibrio que está en armonía con el hecho básico: la masa en los sistemas de fluidos se conserva (Rodríguez, 2017).

En los laboratorios estas plantas de nivel de fluido representan una herramienta indispensable para aprender los principios de instrumentación, dinámica de sistemas y control de procesos en aplicaciones industriales. Es posible establecer prácticas basadas en tales principios, para diseño, simulación e implementación, que son aplicables a los controladores, como el control proporcional-integral-derivativo (PID), control en cascada, control de retroalimentación y control avanzado basado en modelos matemáticos (Larios, 2023).

### **1.4.2.2 Aplicaciones de una Planta de Nivel de Fluidos**

En el campo industrial, las plantas de nivel de fluidos constituyen un modelo a escala de los sistemas empleados en procesos de almacenamiento, mezcla, transporte y tratamiento de líquidos. Este tipo de aplicación suele ser muy común en diversas industrias, donde es necesario mantener niveles específicos de fluido

para asegurar condiciones correctas de operación, siendo un ejemplo de ello evitar derrames del líquido de los tanques.



**Figura 1.1 Tanque con control de Nivel**

#### **1.4.2.3 Fabricación de tanques en acrílico utilizados en Plantas de Nivel**

La fabricación del tanque inicia con el diseño dimensional en un software especializado, como AutoCAD, SolidWorks o Inventor, donde se definen las cotas, el espesor del material, los refuerzos estructurales y las tolerancias de ensamblaje. Esta etapa es fundamental para garantizar la precisión en el corte y la correcta distribución de esfuerzos una vez que el tanque entre en operación, en concordancia con las recomendaciones de diseño y manufactura para láminas de acrílico (Evonik Industries, 2012; ISO, 2015).

A partir del modelo digital, se procede al corte mecanizado de las láminas de acrílico, empleando herramientas CNC o sierras de alta precisión, con el fin de obtener bordes rectos y superficies uniformes que faciliten las uniones, tal como se establece en las directrices para el procesado de polímeros termoplásticos (Crawford & Martin, 2020). Posteriormente, se realiza el biselado y pulido de los cantos, incrementando el área efectiva de contacto y mejorando la adherencia del

adhesivo, siguiendo recomendaciones industriales para garantizar superficies aptas para unión por solventes.

El posicionamiento de las piezas se ejecuta mediante escuadras, prensas y mesas niveladas, asegurando la perpendicularidad de los paneles y minimizando deformaciones durante la fijación, lo cual contribuye directamente a la calidad estructural y a la futura estanqueidad del tanque, aspectos ampliamente documentados en guías de fabricación de acrílico (Altuglas International, 2017; DIN, 2013).

Para la unión de las paredes se utilizan adhesivos solventes a base de metacrilato, los cuales generan una soldadura química por fusión superficial del PMMA. Este método permite obtener un enlace monolítico y transparente, evitando inclusiones de aire y reduciendo el riesgo de fallas por filtración, tal como se describe en las guías de cementado por solvente para acrílicos (Evonik Industries, 2012). La aplicación del adhesivo se ejecuta mediante aguja capilar o jeringa industrial, controlando el caudal para prevenir sobrellenado y asegurar una distribución homogénea, siguiendo las recomendaciones de ensamblaje establecidas para materiales termoplásticos (Altuglas International, 2017). Una vez alineadas las placas, se mantiene presión constante hasta completar el curado inicial, el cual generalmente oscila entre 20 y 40 minutos, dependiendo del tipo de adhesivo y las condiciones operativas (DIN, 2013).

El orden de ensamblaje suele iniciarse con la unión de las paredes laterales entre sí, conformando un marco rígido que posteriormente se fija a la base. Esta secuencia minimiza esfuerzos residuales y favorece que la carga hidrostática, una vez en operación, se distribuya uniformemente, en concordancia con los principios de diseño para recipientes planos de acrílico (ISO, 2015; Crawford & Martin, 2020). Tras el montaje de la base, se instala la tapa superior o los refuerzos perimetrales con el fin de incrementar la rigidez ante flexiones y mejorar la estabilidad estructural del tanque. Finalizado el ensamblaje, el tanque se somete a una prueba de estanqueidad, consistente en un llenado progresivo y una inspección visual para detectar microfisuras o fallos en las juntas, siguiendo los

procedimientos habituales en la fabricación de recipientes acrílicos (Evonik Industries, 2012).

Finalmente, el tanque se acondiciona mediante lijado fino, pulido superficial y limpieza con agentes no abrasivos. Este conjunto de procedimientos permite asegurar que el dispositivo cumpla con lo requerido funcional y estéticamente, y así mismo con las consideraciones de seguridad estructural, integridad hidráulica y vida útil esperada para aplicaciones de almacenamiento de agua en entornos domésticos, industriales o de laboratorio. Dichos acabados finales son consistentes con las recomendaciones establecidas para asegurar la estabilidad y durabilidad de productos fabricados en acrílico (Altuglas International, 2017; Strong, 2006).

### **1.4.3 Sistemas de Comunicaciones Industriales**

Los sistemas de comunicaciones industriales conforman la parte principal para el intercambio de datos entre distintos dispositivos de campos, teniendo como ejemplos a los sensores, las unidades de control (PLC) y sistemas de supervisión (Martínez, 2025)

Es posible identificar tres niveles, los cuales son:

- En el Nivel de Campo se encuentran todos aquellos que tienen contacto directo con la planta que se está trabajando, como lo son los sensores y actuadores.
- En el Nivel de Control se encuentran los dispositivos que se encargan de controlar el proceso con la información que se obtiene en el Nivel del Campo, como lo son los PLC (Controlador Lógico Programable).
- En el Nivel de Información o Gestión el operador recibe toda la información de cómo está actuando la planta en pantallas o monitores, como lo son los HMI, y en base a eso toma las decisiones correspondientes.

Para la correcta implementación de sistemas de nivel académico es necesario que exista una transferencia de datos eficiente entre el controlador y la interfaz del

usuario, ya que esto demuestra que tan correcto es el rendimiento dinámico del sistema. La comunicación serial se encuentra entre las mejores alternativas para este objetivo, puesto que tiene bajo costo de implementación y amplia compatibilidad con gran cantidad de microcontrolador actuales.

#### **1.4.3.1 Comunicación Serial**

La comunicación serial se define como el envío secuencial de información, pudiendo transferir los datos bit a bit a través de un bus o canal físico (Campbell, 2024).

SPI, I2C y UART son algunos de los protocolos estandarizados comúnmente utilizados que siguen los principios de transmisión de datos en serie. El Receptor/Transmisor Asíncrono Universal (UART) es uno de esos estándares que es un circuito físico para transmitir y recibir datos en serie utilizando solo dos cables (Tx y Rx) respectivamente. UART es aquel que facilita la comunicación directa en los microcontroladores con la computadora al permitir que la información se transmita de manera asincrónica sin la necesidad de una señal de reloj común (Campbell, 2024).

##### **1.4.3.1.1 Principio de Funcionamiento de UART**

Dos dispositivos que se comunican directamente en UART utilizan solo dos cables o líneas de conexión para transmitir y recibir datos, conocidos como Transmisión (Tx) y Recepción (Rx). El puerto de Transmisión de un equipo está conectado al puerto de Recepción de otro y viceversa para la comunicación (Campbell, 2024).

Al ser un sistema asíncrono, no existe un reloj externo que marque el ritmo de la transferencia de datos. En su lugar, el sistema depende de que ambos dispositivos estén configurados con la misma velocidad de transmisión, conocida como tasa de baudios (Baud Rate). El transmisor genera un flujo de bits basado en su propia señal de reloj interna, y el receptor muestrea los datos entrantes utilizando su propia señal de reloj interna, la cual debe coincidir en frecuencia con la del emisor para reconstruir la información correctamente (Campbell, 2024).

#### **1.4.3.1.2 Estructura de la Transmisión de Datos**

En el estándar UART se realiza mediante la organización de la información en paquetes o tramas. El proceso inicia cuando el emisor recibe datos paralelos del bus interno (CPU), añade los bits de control necesarios (inicio, paridad y parada) y envía el paquete bit a bit por la línea Tx (Campbell, 2024).

La trama de datos consta de los siguientes componentes según lo indicado por Campbell (2024):

- Bit de inicio: Cuando se encuentra en estado de reposo, la línea se mantiene con un valor de voltaje alto. Para comenzar el envío de datos, el emisor transforma la línea a un valor bajo.
- Trama de datos: Estos datos pueden tener una longitud de 5 a 8 bits si se utiliza un bit de paridad. Por lo general se suelen enviar teniendo en primer lugar al bit menos significativo (LSB).
- Bit de paridad: Puede ser par o impar. Permite al receptor verificar si los datos cambiaron durante la transmisión.
- Bits de parada: Para poder finalizar, el transmisor hace que la línea tenga un valor alto, lo que indica que se ha completado el envío de datos.

#### **1.4.4 MATLAB y Simulink**

MATLAB proporciona un entorno para la programación y el cálculo numérico para el modelado matemático utilizado en programación, simulación y sistemas de inferencia con varios conceptos estadísticos y matemáticos. Su característica distintiva es el procesamiento eficiente de matrices (o funciones matemáticas) y una gran lista de funciones para acelerar el procesamiento de información en operaciones de alta complejidad. MATLAB tiene otros usos: procesamiento de señales, diseño de controladores, análisis de datos, simulación de procesos físicos e industriales (Lin, 2023).

Simulink, al mismo tiempo, es un software gráfico integrado en MATLAB para simular y crear diagramas de bloques para modelar sistemas dinámicos. Cada bloque es solo una pequeña pieza, o una función que puede ilustrar el modelo que está en construcción y reduce la escritura de grandes cantidades de programación. La herramienta contribuye al control automático y muestra sistemas de lazo abierto/cerrado, para ver cómo reaccionan con el tiempo, alternando los ajustes de control y para verificar la operación del sistema antes de que madure físicamente (Lin, 2023).

#### **1.4.4.1 Comunicación Serial en MATLAB/Simulink**

MATLAB dispone del Instrument Control Toolbox para utilizar la comunicación serial, lo que permite que dos dispositivos puedan enviarse información entre sí. Gracias a esta librería, dentro de Simulink se encuentran los bloques Serial Receive, Serial Send y Serial Configuration:

- Serial Receive es donde está la información recibida en el puerto seleccionado.
- Serial Send es donde está la información a enviar mediante el puerto seleccionado.
- Serial Configuration es donde se realiza la configuración serial del dispositivo correspondiente (Giraldo, 2023).

#### **1.4.5 Microcontroladores**

En el diseño electrónico moderno, los microcontroladores actúan como el núcleo de procesamiento central. Son circuitos integrados de alta escala que integran dentro del mismo paquete de silicio una Unidad Central de Procesamiento (CPU), módulos de memoria volátil y no volátil, así como varios periféricos de entrada y salida (Hashemi-Pour & Lutkevich, 2024). Su propósito es el control autónomo de procesos electrónicos mediante la ejecución de un programa almacenado internamente, permitiendo medir variables, procesar esas señales y accionar distintos dispositivos.

En su funcionamiento general, el microcontrolador sigue un ciclo básico de operaciones: primero obtiene (fetch) la instrucción desde su memoria de programa, luego la decodifica (decode) para determinar qué operación realizar, y finalmente la ejecuta (execute), interactuando con sus periféricos de E/S. Mediante cualquier de sus pines, de buses de comunicación y de temporizadores, un microcontrolador puede responder a entradas externas (sensores, botones) y generar salidas (motores, relés, pantallas) según la lógica que se haya definido previamente.

#### 1.4.5.1 ESP-32

Entre el mercado de sistemas embebidos en el Internet de las Cosas – o IoT – el ESP32 – de la empresa Espressif Systems – emerge como una plataforma SoC destacada para sistemas de alto rendimiento. Su arquitectura está diseñada para proporcionar una sólida solución de conectividad dual con protocolos de comunicación inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth integrados en un dispositivo de bajo consumo a bajo costo.

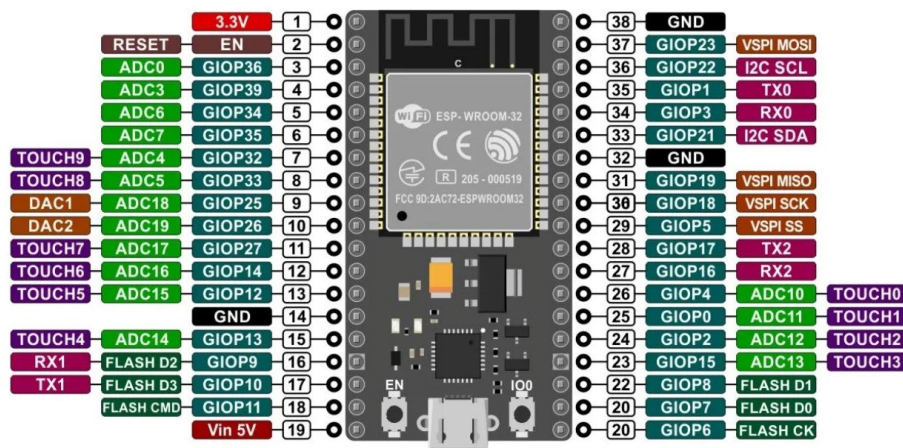


Figura 1.2 Pines de la ESP-32

#### 1.4.5.2 Características de la ESP-32

En cuanto al hardware, el ESP32 es una placa con buen rendimiento. El ESP32 tiene un procesador de doble núcleo Xtensa® LX6 de 32 bits y 520 KB de memoria SRAM interna. La memoria permite al ESP32 ejecutar algoritmos de control rápido y con tiempos de respuesta bajos. El dispositivo funciona bien con muchos

periféricos integrados. El dispositivo también tiene un ADC de 12 bits con hasta 18 canales. El ADC permite al lector leer los datos de los sensores. El dispositivo incluye módulos DAC que generan señales analógicas y bloques PWM que controlan actuadores (Espressif Systems, 2025). El dispositivo también incluye conexiones Wi-Fi y Bluetooth. El dispositivo usa los protocolos SPI, I2C y UART para integrarse en entornos de automatización industrial sin hardware extra.

#### **1.4.5.3 Integración de ESP32 con la Comunicación Serial**

UART es un protocolo que permite que dos dispositivos puedan comunicarse entre sí. Dentro del UART se tiene el TX, el cual envía la información al destinatario, mientras que el RX se encarga de recibir la información que ha sido enviada (Santos & Santos, 2025).

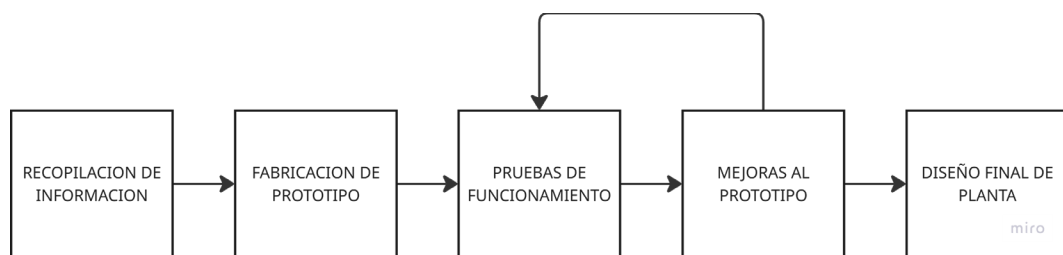
La ESP32 puede tener hasta tres tipos de UART, dependiendo del modelo que se esté utilizando, los cuales son:

- UART0: Se suele utilizar para la comunicación con el monitor serial durante el proceso de subida y debugging.
- UART1 y UART2: Utilizables para comunicarse con dispositivos externos.

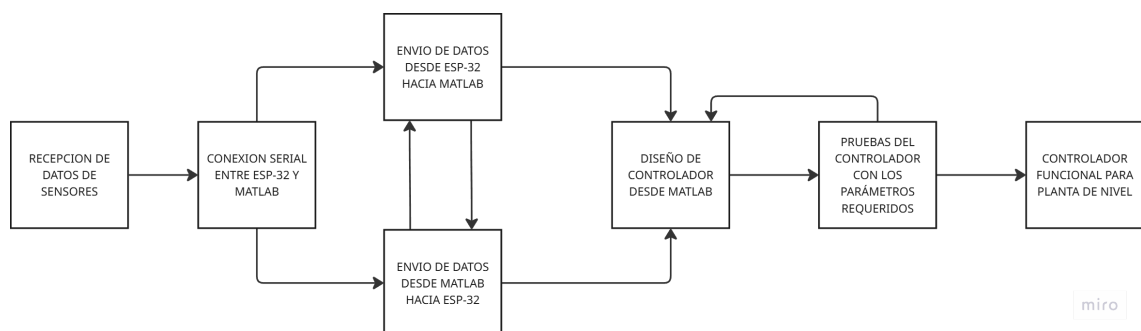
# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente proyecto integrador se estructura en cuatro fases principales: selección de componentes a utilizar, levantamiento de la arquitectura física, diseño del sistema de adquisición y acondicionamiento de señales y desarrollo del entorno de comunicación con MATLAB/Simulink.



**Figura 2.1 Diagrama de bloques para fabricación de planta de nivel**



**Figura 2.2 Diagrama de bloques para comunicación entre ESP-32 y Matlab**

### 2.1 Selección de Componentes

Se eligió utilizar el microcontrolador ESP-32 debido a las facilidades que da para adecuarse al nuevo diseño planteado de la planta, resaltando principalmente el poder trabajar con sensores que tengan salida analógica de voltaje. El resto de los elementos se observan en la Tabla 2.1.

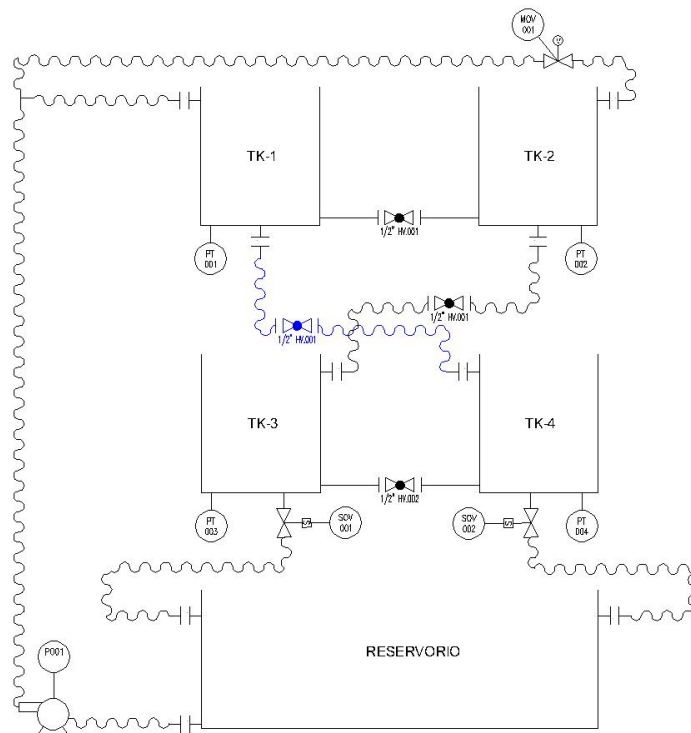
LISTADO DE COMPONENTES		
Material	Cantidad	Precio
ESP-32	1	\$9.95
Sensor de Presión MPXV7002DP	2	\$40.60

Bomba de agua (12v, 4-6.5A)	1	\$64.29
Electroválvula de 12V Plástica	2	\$19.80
NOYITO Convertidor Corriente a Voltaje 4-20mA a 0-3.3V	2	\$13.98
NOYITO Voltaje al módulo de corriente 0-3.3V a 4-20mA	1	\$9.99
Acrílico + Corte laser a medida	1	\$97.75
Pegamento acrílico Weld ON 3	1	\$18.00
Acoples para tanques	11	\$30.25
Válvulas manuales	3	\$17.60
Reducciones, uniones varias, abrazaderas	-	\$25.00
Manguera	8 m	\$8.00
<b>Total</b>	-	<b>\$355.21</b>

**Tabla 2.1 Listado de Componentes**

## 2.2 Caracterización y levantamiento de la arquitectura física

Se realizó un análisis detallado mediante la realización de un diagrama P&ID de la planta de fluidos didáctica, compuesta por cuatro tanques interconectados (TK-1 a TK-4), un reservorio principal y una bomba de alimentación.



**Figura 2.3 Diagrama P&ID de la planta**

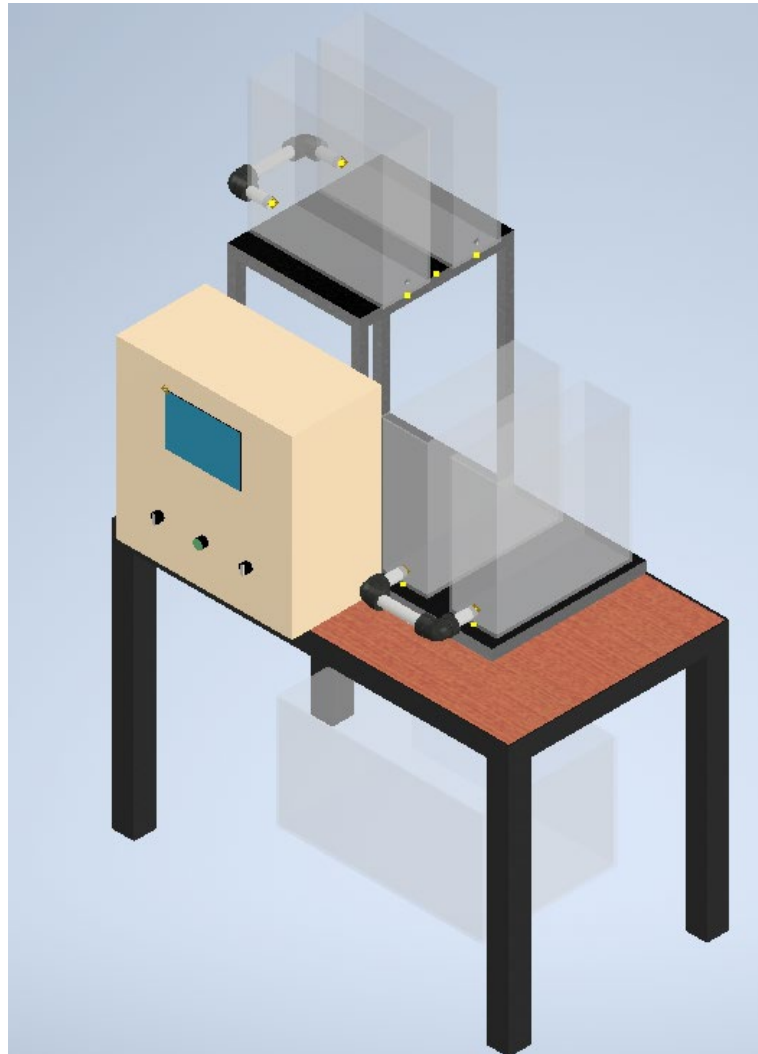
### **2.2.1 Criterios de diseño**

El diseño de la planta de nivel se estableció con el objetivo de disponer de una plataforma experimental versátil que permita el análisis, implementación y validación de estrategias de control de nivel en sistemas multitanque. La configuración adoptada contempla cuatro tanques, distribuidos en dos niveles, con dos tanques en la parte superior y dos en la parte inferior, además de un reservorio ubicado en la base del sistema, hacia el cual descargan los tanques inferiores, garantizando la recirculación continua del fluido.

Cada tanque cuenta con un sensor de nivel y un actuador dedicado, conformando un total de cuatro sensores y cuatro actuadores, lo que permite la medición y manipulación individual de cada variable de proceso. Esta disposición facilita el estudio de sistemas multivariables, así como la evaluación de interacciones hidráulicas entre los tanques.

Los tanques se encuentran interconectados mediante válvulas manuales entre aquellos ubicados en un mismo nivel, lo que posibilita la modificación controlada de las condiciones hidráulicas y de la dinámica del sistema. Adicionalmente, la conexión entre tanques de diferentes niveles se realiza mediante mangueras provistas de acoples rápidos, característica que otorga al sistema un diseño modular, permitiendo su rápido desmontaje, reconfiguración y mantenimiento, así como la implementación de diferentes configuraciones experimentales.

Todos los tanques fueron fabricados en acrílico transparente, criterio adoptado para facilitar la observación directa del comportamiento del nivel, mejorar la comprensión del proceso y reforzar el carácter didáctico y experimental.



**Figura 2.4** Diseño de la planta en Inventor

### **2.2.2 Configuración de los tanques**

La configuración de los tanques se definió a partir de criterios geométricos y operativos que permitan un comportamiento hidráulico estable y una adecuada instrumentación del sistema. Los tanques fueron diseñados con geometría rectangular, presentando una base de 10 cm por 30 cm y una altura total de 30 cm, lo que proporciona un volumen geométrico máximo de 9 L por tanque, aunque los límites máximos y mínimos son 7 L de agua para los tanques superiores, y 6 L de agua para los tanques inferiores. Esta restricción permite disponer de un margen de seguridad adicional, así como mantener el nivel de fluido dentro del rango efectivo de medición de los sensores instalados.

La configuración geométrica de los tanques permite además estimar las condiciones de presión hidrostática a las que se encuentran sometidas las uniones en el punto más bajo del sistema. Considerando una altura máxima de operación de 30 cm y agua como fluido de trabajo, la presión hidrostática en el fondo del tanque puede calcularse mediante la expresión:

$$P = \rho * g * h = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.30 m) = 2.943 [kPa]$$

Valor que será considerado en la etapa de materiales y estructura.

### 2.2.3 Diseño del reservorio

El reservorio fue diseñado con geometría rectangular, presentando dimensiones de base de 30 cm por 46 cm y una altura total de 25 cm. A partir de estas dimensiones, el volumen geométrico total del reservorio se estima en aproximadamente 34.5 L, pero limitado a 32 L máximo por temas de seguridad. Este volumen resulta suficiente para absorber las variaciones de nivel generadas durante la operación del sistema multitanque, evitando vaciados parciales o desbordamientos durante los ensayos.

Al igual que los tanques principales, el reservorio fue construido en acrílico transparente, material seleccionado por su resistencia mecánica, compatibilidad con el fluido de trabajo y facilidad de observación del nivel de agua. La transparencia del material permite una inspección visual continua del comportamiento hidráulico, facilitando la detección de posibles anomalías durante la operación del sistema.

Realizando el mismo cálculo de presión obtenemos la siguiente presión hidrostática:

$$P = \rho * g * h = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.25 m) = 2.452 [kPa]$$

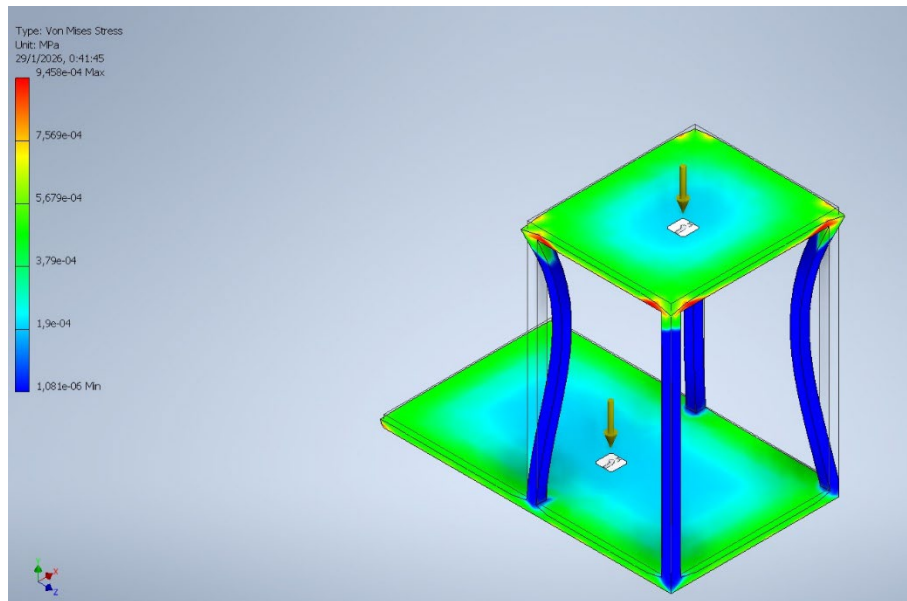
### 2.2.4 Materiales y estructura

La planta experimental fue montada sobre una estructura metálica preexistente de tres niveles, la cual fue seleccionada por su rigidez, estabilidad y disponibilidad. Con

el fin de adaptar la estructura a la nueva configuración del sistema multitanque, se procedió a retirar el nivel intermedio, permitiendo así la correcta ubicación de los tanques adicionales, sensores y elementos de interconexión hidráulica. Esta modificación estructural facilitó una mejor distribución espacial de los componentes, sin comprometer la integridad mecánica del conjunto.

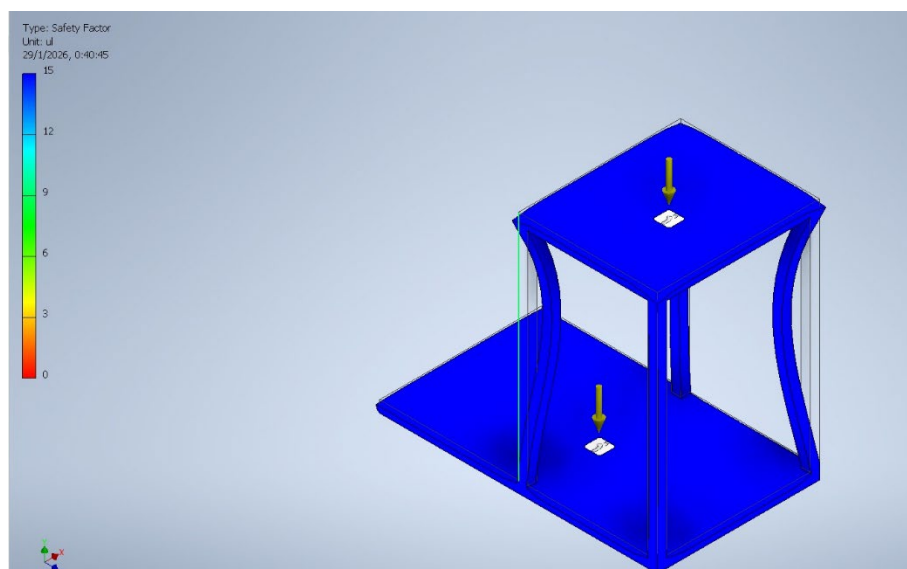
Con el objetivo de verificar el comportamiento estructural de la estructura metálica bajo las condiciones de carga previstas, se realizó un análisis por elementos finitos utilizando Autodesk Inventor. El análisis consideró las cargas asociadas al peso propio de los tanques, el fluido contenido y los elementos auxiliares instalados. Los resultados obtenidos muestran que los valores de esfuerzo principal máximo y mínimo se mantienen dentro de rangos significativamente bajos, evidenciando que la estructura trabaja predominantemente en el régimen elástico. El esfuerzo principal máximo se concentra en zonas puntuales cercanas a las uniones entre columnas y plataformas, sin alcanzar valores críticos que comprometan la seguridad estructural.

El análisis de esfuerzo equivalente de Von Mises indica una distribución uniforme de esfuerzos a lo largo de los elementos portantes, con concentraciones moderadas en las zonas de conexión, lo cual es consistente con la geometría y las condiciones de carga aplicadas. Los valores máximos obtenidos se encuentran muy por debajo del límite elástico del material (250 MPa), confirmando que la estructura posee una capacidad suficiente para soportar las cargas operativas del sistema.



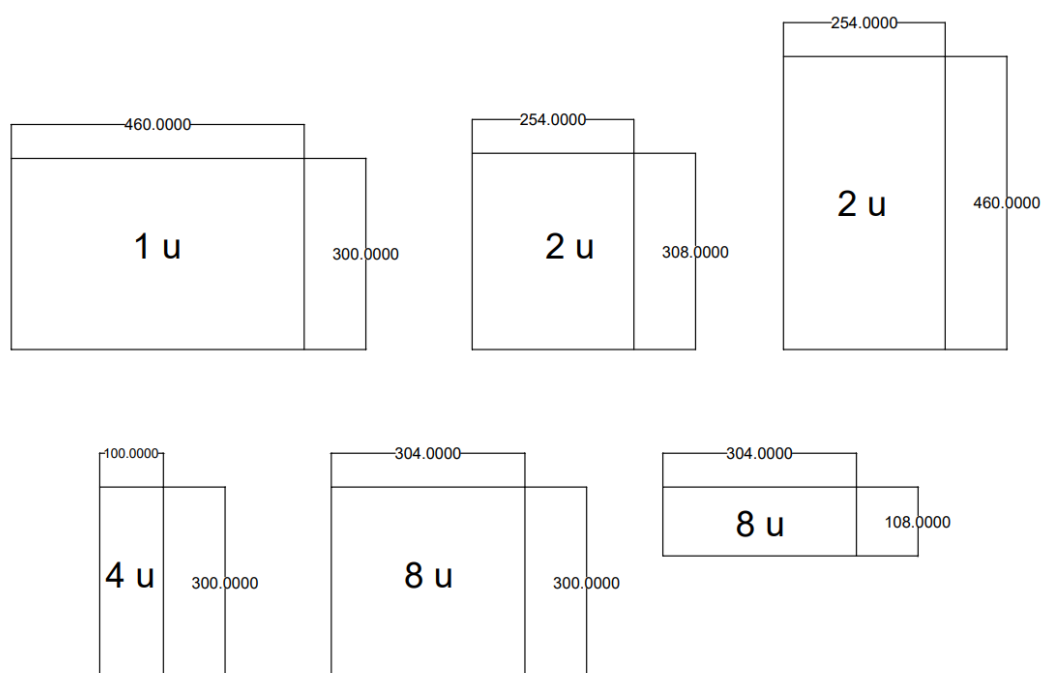
**Figura 2.5 Análisis de esfuerzo de Von Mises de la estructura metálica de la planta**

Finalmente, el análisis del factor de seguridad muestra valores elevados en la totalidad de la estructura, lo que evidencia un amplio margen de seguridad frente a fallas por sobreesfuerzo. Este resultado valida la decisión de reutilizar la estructura metálica existente, incluso tras la modificación realizada, garantizando condiciones adecuadas de estabilidad y seguridad durante la operación continua de la planta experimental.



**Figura 2.6 Análisis de factor de seguridad de la estructura metálica de la planta**

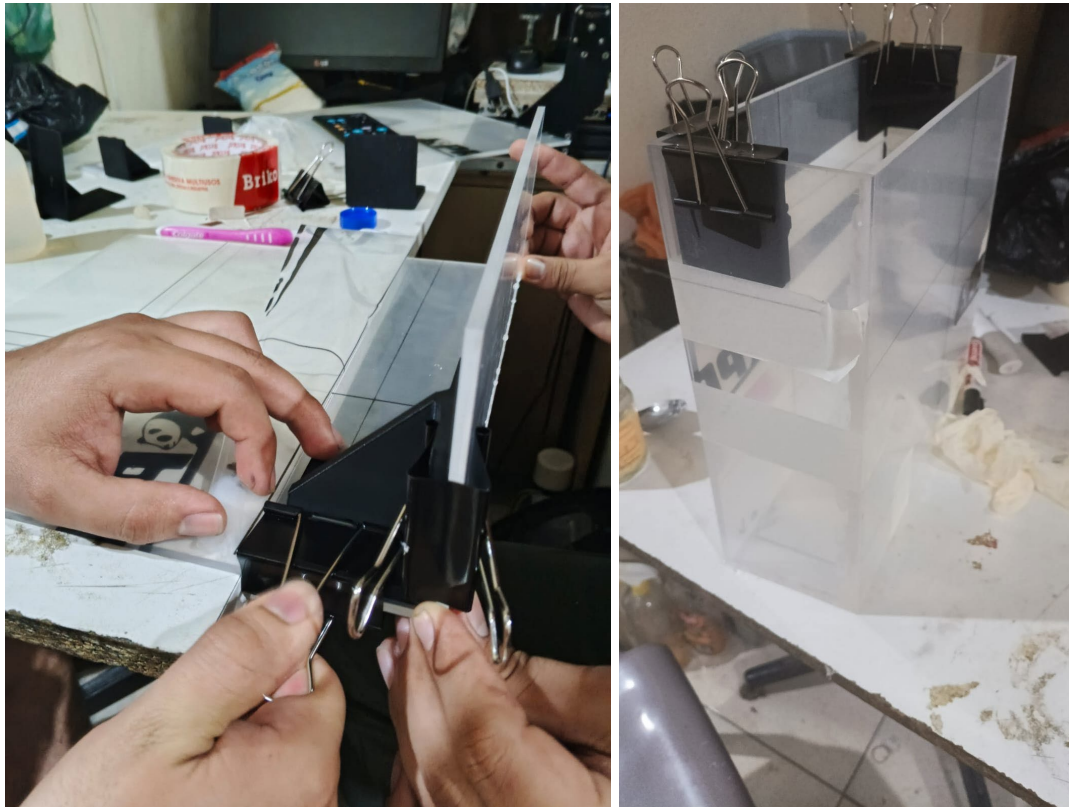
La fabricación de los tanques de acrílico se realizó a partir del diseño previo de los cortes necesarios para cada uno de los elementos estructurales, considerando láminas de acrílico de 4 mm de espesor. La selección de este espesor se justificó en función del compromiso entre rigidez mecánica, peso y facilidad de manufactura, dado que proporciona una resistencia suficiente para soportar las presiones hidrostáticas generadas durante la operación del sistema, sin incrementar de manera significativa el peso del conjunto ni dificultar los procesos de corte y ensamblaje. Adicionalmente, este espesor permite una adecuada manipulación del material y una correcta adhesión en las uniones, aspectos relevantes para garantizar la estanqueidad de los tanques.



**Figura 2.7 Diseño de las piezas utilizadas en cada tanque**

En una etapa inicial, la unión de las piezas de acrílico se realizó utilizando un polímero dental, seleccionado preliminarmente por su disponibilidad y facilidad de aplicación. No obstante, durante las primeras pruebas de estanqueidad se evidenció la presencia de fugas en las juntas, lo que puso de manifiesto una resistencia insuficiente y una limitada compatibilidad del material con el acrílico en condiciones de operación continua. Como medida correctiva, dicho polímero fue reemplazado por el solvente acrílico Weld-On 3, adhesivo diseñado específicamente para la unión de

acrílico mediante un proceso de fusión superficial. Este adhesivo desarrolla una resistencia típica de unión del orden de 2 000 [psi], equivalente a aproximadamente 13 790 [kPa], valor ampliamente superior a los esfuerzos inducidos por la presión hidrostática del sistema, lo que se traduce en un factor de seguridad elevado para las uniones estructurales.



**Figura 2.8** Ensamble de tanques de acrílico

Substrate Material	Aged Bond Strength, lbs/in <sup>2</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )		
	2 Hours	24 Hours	1 Week
Acrylic (Cast & Extruded)	800 (56.3)	2,000 (140.6)	2,500 (175.8)

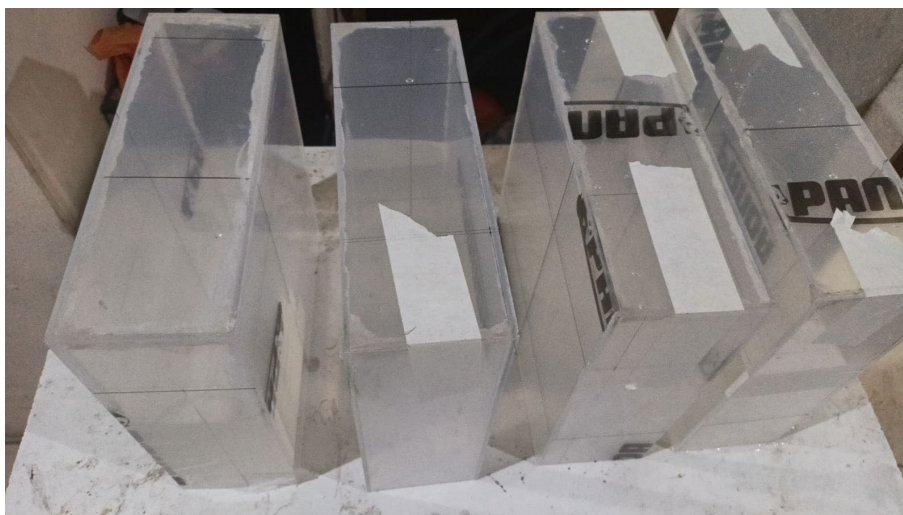
**Tabla 2.2** Resistencia mecánica de las uniones utilizando Weld-On 3

Una vez finalizado el proceso de ensamblaje con el adhesivo seleccionado, se realizaron pruebas de estanqueidad con una duración de 24 horas, manteniendo los tanques llenos hasta su nivel operativo máximo. Estas pruebas permitieron verificar la ausencia de fugas y confirmar la integridad de las uniones, validando el proceso

de fabricación adoptado y garantizando condiciones seguras de operación para el desarrollo de las pruebas experimentales posteriores.



**Figura 2.9 Pruebas de estanqueidad de tanques de acrílico**



**Figura 2.10 Tanques de acrílico luego de las pruebas**

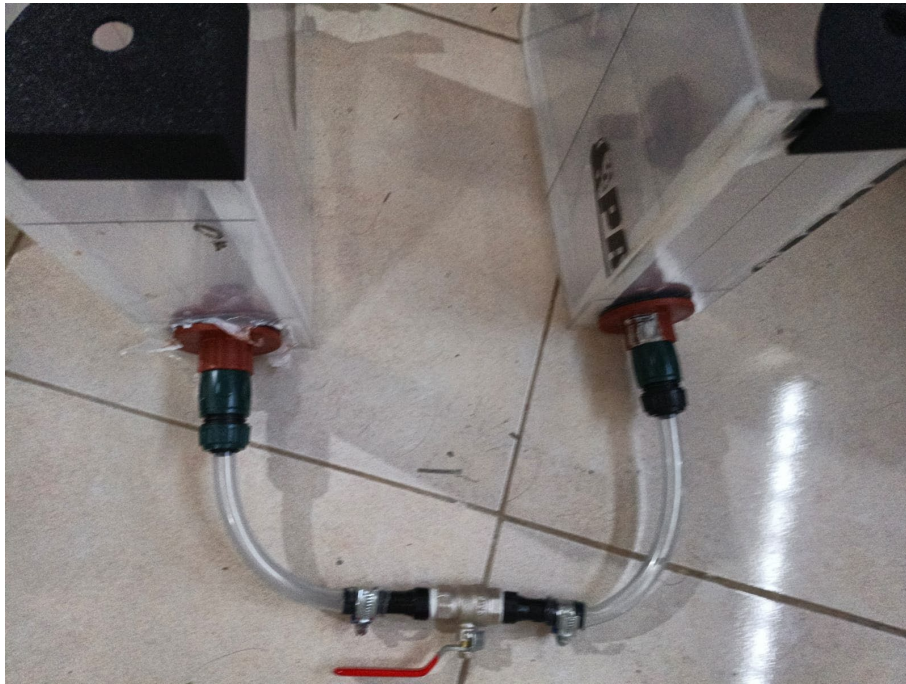
### 2.2.5 Integración mecánica-hidráulica

La integración mecánica–hidráulica de la planta de nivel se realizó con el objetivo de garantizar una correcta interconexión entre los tanques, facilitar la instrumentación del sistema y permitir una operación flexible y segura durante las pruebas experimentales. Para este propósito, se efectuaron las perforaciones correspondientes en las paredes de los tanques, las cuales permitieron la instalación de acoples pasatanques, asegurando una unión estanca entre los elementos hidráulicos externos y el volumen interno de cada tanque.



**Figura 2.11 Acoples pasatanques incorporados al sistema**

Mediante el uso de estos acoples fue posible incorporar válvulas manuales, sensores y puntos de conexión hidráulica, garantizando una adecuada fijación mecánica y evitando fugas durante la operación del sistema. El paso del fluido entre los diferentes tanques se realizó utilizando mangueras flexibles, acopladas mediante conectores rápidos, lo que proporciona un alto grado de modularidad al sistema. Esta configuración permite unir o separar fácilmente cualquier conjunto de tanques, facilitando las tareas de mantenimiento, limpieza y reconfiguración de la planta sin necesidad de desmontajes complejos.



**Figura 2.12 Pruebas con acoples rápidos**



**Figura 2.13 Reducciones instaladas en sensores industriales**



**Figura 2.14 Reducciones instaladas en válvulas proporcionales**

La disposición hidráulica fue diseñada de tal forma que el fluido proveniente de los tanques superiores e inferiores desemboca finalmente en el reservorio ubicado en la parte inferior de la planta, cerrando el circuito hidráulico. En este reservorio se encuentra además la toma de succión de la bomba, desde donde se impulsa nuevamente el agua hacia el sistema, iniciando un nuevo ciclo de operación. Esta configuración garantiza una recirculación continua del fluido y una operación estable del sistema durante los ensayos de control de nivel.



Figura 2.15 Reservorio con mangueras de succión y descarga instaladas

### 2.2.6 Instrumentación y actuadores

Se utilizarán los siguientes elementos de instrumentación:

- **Sensores de nivel por presión (4–20 mA):** PT-001 en TK-1 y PT-002 en TK-2.
- **Sensores de nivel por presión tipo voltaje:** PT-003 en TK-3 y PT-004 en TK-4, con rango de salida 0.5–4.5 V.
- **Válvula proporcional en TK-2:** actuador con entrada eléctrica 4–20 mA y módulo electrónico interno que entrega una señal PWM como señal de retroalimentación.
- **Válvulas manuales de interconexión:** utilizadas para establecer diferentes configuraciones hidráulicas de operación.
- **Electroválvulas SOV-001 y SOV-002:** ubicadas en las líneas de descarga de TK-3 y TK-4.
- **Bomba de agua P001:** la succión se encuentra dentro del reservorio, y la descarga va directamente a TK-1 y, por medio de la válvula proporcional, a TK-2.



**Figura 2.16 Estado final de la planta de nivel (vista frontal)**



**Figura 2.17 Estado final de la planta de nivel (vistas laterales)**

A partir de estos elementos se elaboró el mapa de entradas y salidas (I/O) requerido para la integración con un microcontrolador ESP-32.

<b>ENTRADAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
LT-T001	NIVEL DEL TANQUE TK-1
LT-T002	NIVEL DEL TANQUE TK-2
LT-T003	NIVEL DEL TANQUE TK-3
LT-T004	NIVEL DEL TANQUE TK-4
<b>SALIDAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
MOV-001	VÁLVULA PROPORCIONAL
P-001	BOMBA 12V
SOV-001	VÁLVULA SOLENOIDE 1
SOV-002	VÁLVULA SOLENOIDE 2

**Tabla 2.3 Mapa de Entradas y Salidas**

## 2.3 Dimensionamiento eléctrico

### 2.3.1 Fuente de Voltaje 12VDC

Se utilizará una fuente de voltaje de 12VDC para alimentar gran parte de los componentes a utilizar en el proyecto. Los atributos técnicos están en la Tabla 2.4.



Figura 2.18 Fuente de 12 VDC

Datos técnicos	
Voltaje de Salida	12 VDC
Valor máximo de corriente	10 A
Potencia	120 W
Tiempo de Activación	20ms/230 V AC
Voltaje de Entrada	100 – 120 V AC

Tabla 2.4 Ficha técnica de la Fuente 12 VDC

### 2.3.2 ESP-32

El microcontrolador que se utilizará es la ESP-32, la cual se encargará de llevar a cabo todo el proceso de la planta. Las características del microcontrolador fueron revisadas en el punto 1.4.5.2.

### 2.3.3 Bomba de Agua

La bomba seleccionada resulta adecuada, puesto que otorga un equilibrio óptimo entre caudal y presión, garantizando un funcionamiento eficiente del sistema y un uso racional de los recursos hídricos. Las características técnicas se observan a continuación.



Figura 2.19 Bomba de Agua

Datos técnicos de la Bomba de Agua	
Voltaje	12 V
Corriente	4-6.5 A
Presión	0.85 MPa
Flujo	7-9 Litros/minuto
Entrada y Salida de Agua	Puerto tornillo de 181.80 m

Tabla 2.5 Características de la Bomba de Agua

### 2.3.4 Sensor Industrial de Presión XK-131

Estos sensores se utilizarán en los tanques 1 y 2 para poder medir la presión que hay en el tanque, con la finalidad de convertir ese valor después a altura en décimas de mm. Sus principales características se visualizan en la siguiente tabla.



Figura 2.20 Sensor de Presión Industrial XK-131

Datos técnicos del Sensor de Presión Industrial	
Voltaje de Alimentación	12 – 36 VDC
Rango de Presión	0-0.25 bar
Corriente de Salida	4-20 mA

Tabla 2.6 Datos Técnicos del Sensor de Presión Industrial

### 2.3.5 Sensor de Presión MPXV7002DP

Estos sensores se utilizarán en los tanques 3 y 4 para poder medir la presión que hay en el tanque ingresando una manguera al fondo del tanque, con la finalidad de convertir ese valor después a altura en décimas de mm. Los datos nominales se observan a continuación.

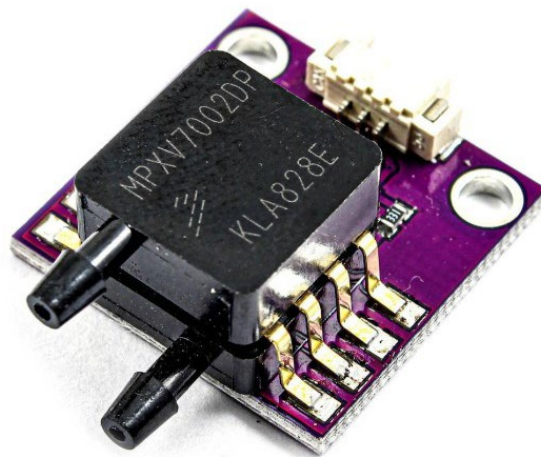


Figura 2.21 MPXV7002DP

Datos técnicos	
Voltaje de Alimentación	5 VDC
Rango de Presión	-2kPa hasta +2Kpa
Voltaje de Salida	0.5-4.5 V
Tiempo de respuesta	1 ms

Tabla 2.7 Ficha técnica del MPXV7002DP

### 2.3.6 Electroválvulas de 12VDC

Estas electroválvulas permiten que el agua almacenada en los tanques 3 y 4 vuelvan al reservorio. Funcionan de manera ON/OFF y sus características completas se encuentran a continuación.



Figura 2.22 Electroválvula de 12 VDC

Datos técnicos	
Voltaje	12 VDC
Corriente	0.6 A
Potencia	8 W
Tiempo de respuesta	$\leq 0.15$ s
Presión mínima	0.02 MPa
Presión máxima	0.8 MPa

Tabla 2.8 Ficha técnica de la Electroválvula

### 2.3.7 Válvula Proporcional

Esta válvula se encuentra en el tanque 2 y permite controlar la cantidad de agua que recibe el tanque. Los atributos técnicos se encuentran en la Tabla 2.9.



Figura 2.23 Válvula Proporcional

Datos técnicos de la Válvula Proporcional	
Voltaje de Operación	9-24 V DC
Entrada	4 mA-20 mA
Salida	PWM OC

Tabla 2.9 Datos Técnicos de la Válvula Proporcional

### 2.3.8 Convertidor Voltaje a Corriente XF0136-02

Este convertidor permite obtener corriente (4-20mA) a partir de una entrada de voltaje, siendo en este caso 0-3.3V. Se usa para controlar la válvula proporcional del tanque 2 y sus especificaciones están en la Tabla 2.10.



Figura 2.24 Convertidor XF0136-02

Datos técnicos del Convertidor XF0136-02	
Voltajes de Entrada	0-3.3 V/0-5 V/0-10 V
Corriente de Salida	0-20 mA/4-20 mA
Alimentación	12-30 VDC

Tabla 2.10 Datos Técnicos del Convertidor XF0136-02

### 2.3.9 Convertidor Corriente a Voltaje HW-685

Este convertidor permite obtener voltaje (0-3.3V) a partir de una entrada de corriente, siendo en este caso 4-20mA. Se usa para que la ESP-32 puede trabajar con las mediciones que hacen los sensores industriales de corriente. Los parámetros operativos están en la Tabla 2.11.



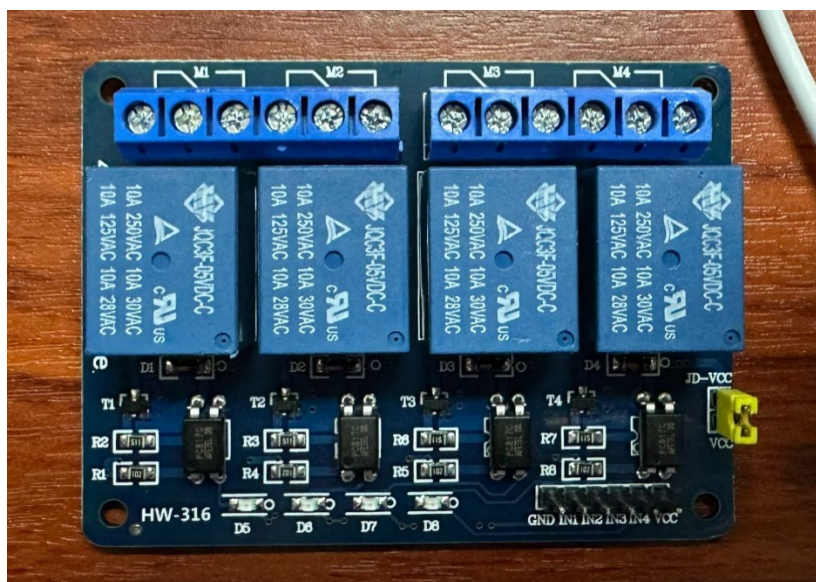
**Figura 2.25 Convertidor HW-685**

<b>Datos técnicos del Convertidor HW-685</b>	
Corriente de Entrada	4-20mA
Voltajes de Salida	0-3.3V/0-5V/0-10V
Alimentación	7-36 VDC

**Tabla 2.11 Datos Técnicos del Convertidor HW-685**

### 2.3.10 Módulo Relé HW-316

Este módulo relé permite abrir o cerrar las electroválvulas de los tanques 3 y 4 mediante el uso de sus contactos NC (Normalmente cerrado). Los datos técnicos están en la Tabla 2.12.



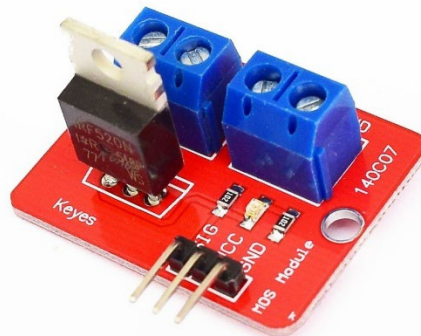
**Figura 2.26 Módulo HW-316**

<b>Datos técnicos del Módulo HW-316</b>	
Voltaje	5 VDC
Señal de Control	TTL (3.3V o 5V)
Valor máximo de corriente	10 A (Abierto), 5 A (Cerrado)
Tiempo de acción	10ms/5ms

**Tabla 2.12 Datos Técnicos del Módulo HW-316**

### 2.3.11 Módulo IRF520

Este módulo permite controlar la bomba de agua mediante una señal PWM de bajo voltaje proveniente de la ESP32. Sus características se pueden observar en la Tabla 2.13.



**Figura 2.27 Módulo IRF520**

<b>Datos técnicos del Módulo IRF520</b>	
Voltaje	(VCC) y (SIG): 3.3 V – 5 V Carga (VIN): 5-24 V DC
Corriente de carga	5 A
Potencia máxima	60 W
Peso	8.6 gramos

**Tabla 2.13 Datos Técnicos del Módulo IRF520**

## 2.4 Diseño del sistema de adquisición y acondicionamiento de señales

El diseño del sistema de adquisición y acondicionamiento de señales constituye una etapa fundamental en el presente proyecto, ya que permite garantizar que las variables físicas medidas en la planta de fluidos sean convertidas en señales eléctricas compatibles, estables y confiables para su procesamiento digital mediante la tarjeta de desarrollo ESP32 y su posterior integración con el entorno MATLAB/Simulink.

Las variables físicas medidas corresponden al nivel de agua que existe en cada uno de los 4 tanques, y para esto cada tanque tiene su respectivo sensor de presión. Dentro de MATLAB/Simulink se trabajará con la altura en mm, por lo que es necesario convertir esos valores de presión para poder trabajar correctamente.

En el caso de los tanques superiores (Tanque 1 y Tanque 2) sus sensores de presión tienen un rango de 0-0.25 bares y otorgan una salida de corriente de 4-20mA. Lo primero que se debe realizar es transformar esos miliamperios en voltios capaz de trabajar con la ESP32, por lo que se utiliza el convertidor HW-685 para tener una salida que este en el rango de 0-3.3V. El convertidor ADC de la ESP32 trabaja con 12 bits de resolución por defecto, por lo que al recibir 0V mostrará 0 y al recibir 3.3V mostrará 4095 ( $2^{12} = 4096$ ).

Para la conversión a altura tomamos dos puntos: el 0mm que es cuando el tanque está vacío y 2300 décimas de mm que es cuando el tanque ha llegado a su altura máxima. En cada caso se anota los valores que el ADC arroja con el objetivo de hacer una ecuación donde la altura se obtenga en función de la resolución del ADC.

Para los tanques inferiores (Tanque 3 y Tanque 4) sus sensores de presión tienen un rango que va desde los -2kPa hasta los 2kPa, dando una salida de voltaje con un rango de 0.5V hasta 4.5V. El punto donde mide que la presión es 0kPa es cuando el voltaje es 2.5V, por lo que para evitar que el voltaje suba hasta más de 3.3V (límite de la ESP32) se va a trabajar midiendo presión negativa. Eso quiere decir que el voltaje va a oscilar entre 2.5V (tanque vacío) y 0.5V (tanque lleno), y para hacer esto

se requiere que una manguera se coloque en el puerto de la parte de abajo del sensor y dejar el de arriba a la atmosfera. El otro fin de la manguera va al fondo del tanque para medir correctamente la presión.

Para la conversión a altura tomamos dos puntos: el 0mm que es cuando el tanque está vacío y 2000 décimas de mm que es cuando el tanque ha llegado a su altura máxima. En cada caso se anota los valores que el ADC arroja con el objetivo de hacer una ecuación donde la altura se obtenga en función de la resolución del ADC. La principal diferencia con los otros sensores es que, como se está trabajando con presión negativa, cuando el tanque este vacío va a mostrarse un valor de resolución mayor al que se muestre cuando está lleno.

## **2.5 Integración del microcontrolador ESP-32 con MATLAB/Simulink mediante Comunicación Serial**

### **2.5.1 Arquitectura de Comunicación**

La Comunicación Serial se fundamenta en una topología Maestro-Esclavo sobre un enlace físico punto a punto, donde el entorno de simulación MATLAB/Simulink actúa como el nodo supervisor (Maestro) y el microcontrolador ESP32 opera como la unidad de adquisición y control (Esclavo).

La comunicación se establece a través de una interfaz serial asíncrona (UART), implementada físicamente mediante el protocolo USB-CDC. Esto permite la creación de un puerto COM virtual en el ordenador, facilitando la transmisión de datos transparente y bidireccional (Full-Duplex).

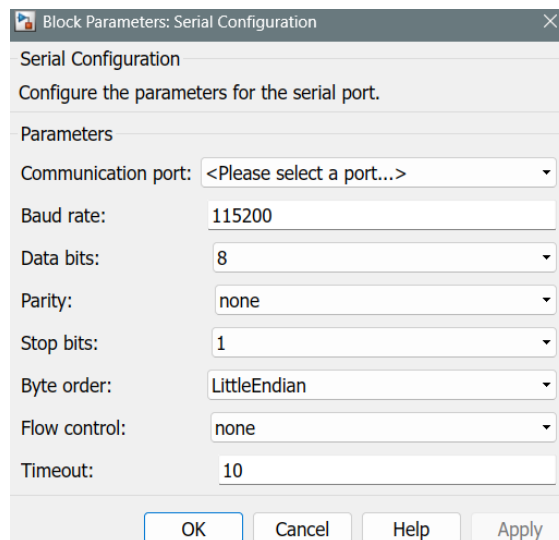
El flujo de información se estructura en dos canales lógicos:

- Canal de Mando (Downlink): Transmisión de consignas de control desde el PC hacia los actuadores.
- Canal de Monitoreo (Uplink): Transmisión de variables de estado del proceso (Señal del sensor de presión procesada) desde el ESP32 hacia el PC.

## 2.5.2 Configuración de la Comunicación Serial entre ESP-32 y MATLAB/Simulink

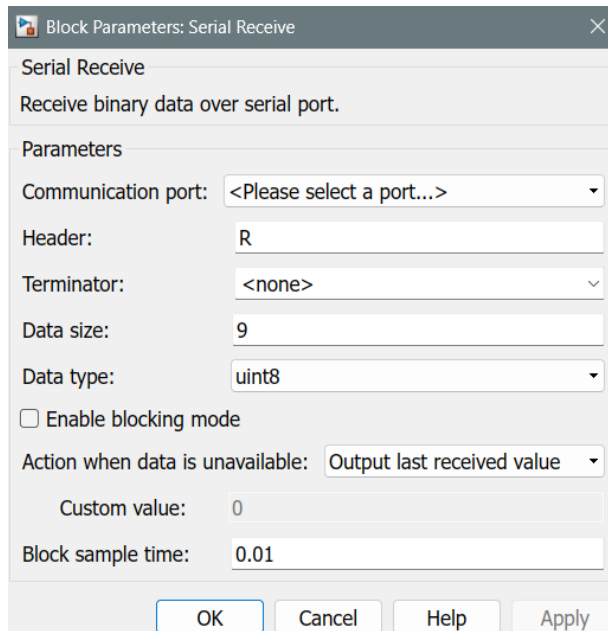
Dentro de Simulink hay que colocar tres bloques específicos para realizar este tipo de comunicación: Serial Configuration, Serial Receive y Serial Send. Cada uno de esos bloques hará posible que se pueda realizar la comunicación de manera correcta.

El bloque Serial Configuration nos permite configurar el puerto serial que se utilizará, la velocidad de baudios (la misma que en la ESP-32), la cantidad de bits, paridad y bits de parada. Los parámetros se observan en la Figura 2.28.



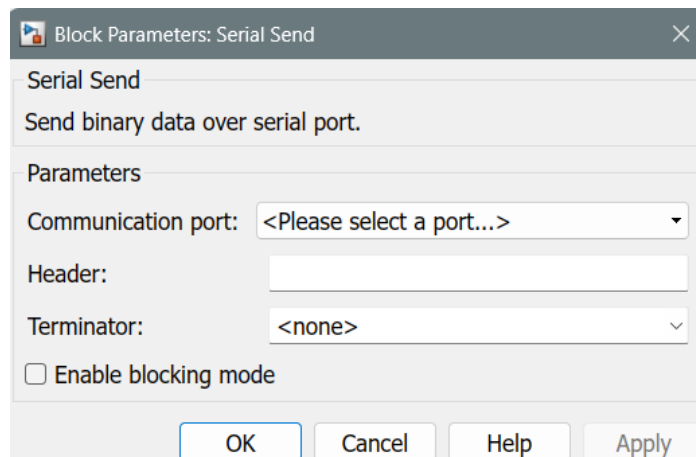
**Figura 2.28 Parámetros de Serial Configuration**

El bloque Serial Receive nos permite configurar el puerto serial de donde se recibirá la información, la cabecera, la cantidad de bytes a recibir y el tipo de dato. Los parámetros son mostrados en la Figura 2.29.



**Figura 2.29 Parámetros de Serial Receive**

El bloque Serial Send nos permite configurar el puerto serial por donde se recibirá la información, la cabecera y el terminador. Los parámetros pueden visualizarse en la siguiente figura.



**Figura 2.30 Parámetros de Serial Send**

Para la cantidad exacta de bytes que se enviarán se necesitará declarar cada uno de los datos y juntarlos en un multiplexor, el cual se conectará a la entrada del bloque Serial Send.

### 2.5.3 Funcionamiento de la Comunicación Serial entre ESP-32 y MATLAB/Simulink

El puerto serial que se utilizará transmite la información en 8 bits (1 byte), mientras que las variables del proceso, como lo son los niveles que hay en cada tanque, son enteros de 16 bits. Es por esta razón que se necesitará una estrategia que permita realizar el envío y recibo de información de manera correcta y adecuada.

#### 2.5.3.1 Trama de Transmisión (ESP-32 a Simulink)

El microcontrolador enviará un paquete de 10 bytes, cuya estructura se observa en la Tabla 2.14

Paquete de Datos	
Byte 0	Cabecera 'R'
Byte 1	Byte Alto de Nivel de Tanque 3
Byte 2	Byte Bajo de Nivel de Tanque 3
Byte 3	Byte Alto de Nivel de Tanque 4
Byte 4	Byte Bajo de Nivel de Tanque 4
Byte 5	Byte Alto de Nivel de Tanque 1
Byte 6	Byte Bajo de Nivel de Tanque 1
Byte 7	Byte Alto de Nivel de Tanque 2
Byte 8	Byte Bajo de Nivel de Tanque 2
Byte 9	10 (Terminador)

**Tabla 2.14 Paquete de Datos para la Transmisión**

Las variables de 16 bits se descomponen en dos partes: Byte Alto y Byte Bajo mediante el uso de operaciones para desplazamiento de bits siguiendo el formato Little Endian. A continuación, se muestra la forma de realizar este desplazamiento:

```
bf_tx[1] = (n1 >> 8) & 0xFF; // Byte Alto n1
bf_tx[2] = n1 & 0xFF; // Byte Bajo n1
```

### 2.5.3.1 Trama de Recepción (Simulink a ESP-32)

Simulink enviará las acciones para cada uno de los actuadores encapsuladas en un paquete de 6 bytes, cuya estructura se visualiza aquí:

Paquete de Datos	
Byte 0	Cabecera 'V'
Byte 1	Electroválvula 1
Byte 2	Electroválvula 2
Byte 3	Válvula Proporcional (DAC)
Byte 4	Bomba de Agua (PWM)
Byte 5	10 (Terminador)

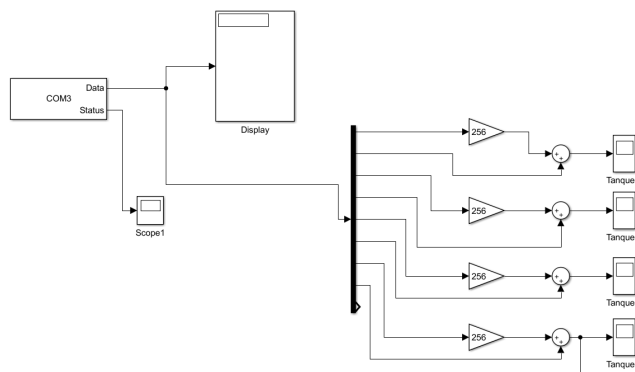
**Tabla 2.15 Paquete de Datos para la transmisión**

Los valores serán enviados de forma directa con 8 bits (uint8) debido a que el formato es compatible con el del protocolo de Comunicación Serial (0-255).

### 2.5.3.2 Algoritmo de Reconstrucción en Simulink

Para poder recuperar los valores originales de 16 bits se implementará una operación matemáticas inversas con los bytes fragmentados, la cual será:

$$Valor_{16\ bits} = (Byte_{Alto} * 256) + Byte_{Bajo}$$



**Figura 2.31 Operación matemática aplicada en Simulink**

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Estabilidad del Protocolo Serial

Al momento de utilizar la comunicación serial se escogió una velocidad de 115200 baudios, tanto en la ESP-32 como en MATLAB/Simulink. Esta velocidad hizo que los datos se transfirieran de manera rápida, sin casi pérdida de datos.

Dentro del código de la ESP-32 se utilizó una función que hace un promedio de n cantidad de muestras, con el objetivo de reducir el ruido de las señales recibidas por los sensores. Ese promedio es enviado a MATLAB/Simulink para que pueda ser graficado mediante un Display. Al momento de realizar pruebas se pudo observar un retardo considerable debido a esta función puesto que se había configurado que haga un promedio de 100 muestras.

```
// -----  
// FUNCIÓN AUXILIAR  
// -----  
int leerPromedio(int pin, int muestras) {  
    long suma = 0;  
    for (int i = 0; i < muestras; i++) {  
        suma += analogRead(pin);  
        delay(1); // Pequeña pausa de lms para estabilizar el ADC  
    }  
    return (int)(suma / muestras);  
}
```

**Figura 3.1 Función leerPromedio**

Gracias al valor de muestras de 100 se generaba un retardo de aproximadamente 30 segundos para realizar un orden que llegaba desde Simulink hacia la ESP-32. Por lo que para corregir esto se decidió utilizar un valor de muestras de 10, lo que hizo que el sistema reaccionara casi instantáneo a las órdenes de Simulink.

### 3.2 Calibración de los Sensores de Nivel

La ESP-32 recibió cada una de las lecturas que realizaban todos los sensores mediante sus pines ADC, los cuales tienen una resolución de 12 bits (0-4095). Esto

significa que la ESP-32 recibió valores entre 0 y 4095, los cuales representaban la presión de los tanques. Estos valores no son fáciles de entender, por lo que se realizó una conversión de estos para poder representarlos en altura. La unidad escogida fue decima de milímetro, lo que significa que, si por ejemplo si el tanque 1 llega a su altura máxima de 23cm, en Simulink llegará un valor de 2300 aproximadamente.

### 3.2.1 Calibración de los sensores del Tanque 1 y Tanque 2

En el caso de los sensores que tienen salida de corriente se utilizó un módulo convertidor corriente a voltaje, por lo que también hubo que calibrar los potenciómetros que vienen en el módulo (ZERO y SPAN). Se logró regularlos de la siguiente manera: cuando había una entrada de 4 mA hubo una salida de 0.02 V, mientras que cuando había una entrada de 20 mA hubo una salida de 0.51 V.

Esos valores calibrados son los que llegaban al ADC de la ESP-32, por lo que hubo que convertirlos en valores de altura para que puedan ser analizados correctamente. La conversión se la realizó directamente en la programación de la ESP-32 utilizando dos puntos: uno cuando el tanque estaba vacío y otro cuando lleno.

En el tanque 1 cuando estaba vacío (0cm) mostraba un valor de 0 y cuando estaba lleno (23cm) marcaba un valor de 475 en el monitor serial. Con esos dos puntos se realizó la matemática correspondiente para obtener la siguiente ecuación que escala los valores a un rango de 0-2300:

```
n3=4.8421*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE1, 10)); //Sensor de Corriente Tanque 1
```

#### Figura 3.2 Ecuación de altura del Tanque 1

En el tanque 2 cuando estaba vacío (0cm) mostraba un valor de 0 y cuando estaba lleno (23cm) marcaba un valor de 465 en el monitor serial. Con esos dos puntos se realizó la matemática correspondiente para obtener la siguiente ecuación que escala los valores a un rango de 0-2300:

```
n4=4.946*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE2, 10)); //Sensor de Corriente Tanque 2
```

### Figura 3.3 Ecuación de altura del Tanque 2

Las ecuaciones entre los dos tanques tienen una ligera diferencia debido a que se colocó un sensor de presión un centímetro más alto que el otro sensor, sin embargo, este cambio en la ecuación solucionó ese inconveniente.

#### 3.2.2 Calibración de los sensores del Tanque 3 y Tanque 4

Para los sensores que tienen salida de voltaje, se tuvo en cuenta el rango de voltaje: de 0.5 V a 4.5V para una presión de entre -2 KPa Y 2KPa. El punto Zero del sensor, es decir cuando la presión es 0KPa, dio como salida de voltaje 2.5 V. Tomando en cuenta el voltaje límite de los pines de la ESP-32 (3.3V) se decidió trabajar con la presión negativa para que no superara los 3.3 V.

Esos valores son los que llegaban al ADC de la ESP-32, por lo que hubo que convertirlos en valores de altura para que puedan ser analizados correctamente. La conversión se la realizó directamente en la programación de la ESP-32 utilizando dos puntos: uno cuando el tanque estaba vacío y otro cuando lleno. El principal objetivo fue escalarlos dentro del rango especificado: 0cm hasta llegar a los 20cm. La ecuación que se obtuvo es la siguiente:

```
n1 = -0.8*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE3, 10))+2634; //Sensor de Voltaje Tanque 3  
n2 = -0.8*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE4, 10))+2634; //Sensor de Voltaje Tanque 4
```

### Figura 3.4 Ecuación de altura de los tanques 3 y 4

#### 3.3 Caracterización de los Actuadores

En la planta se tienen 4 actuadores que pudieron ser manipulados desde Simulink, los cuales son: Bomba de Agua, Válvula Proporcional y Dos Electroválvulas.

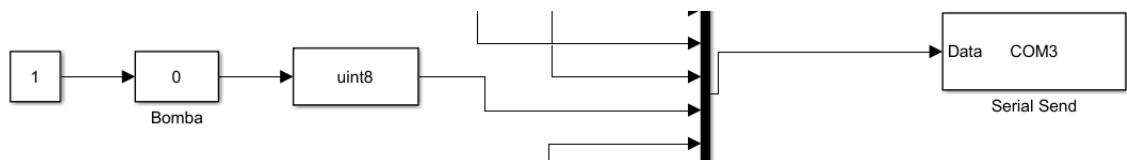
### 3.3.1 Respuesta de la Bomba de Agua

Para la bomba se utilizó un módulo MOSFET que permitió controlarla mediante el uso de una señal PWM proveniente de la ESP-32. La configuración PWM que se utilizó se muestra a continuación:

```
// --- CONFIGURACIÓN PWM ---  
const int freq = 2000;      //  
const int canalPWM = 0;    // Canal 0  
const int resolucion = 8;  // 8 bits (0-255)
```

**Figura 3.5 Configuración PWM**

La resolución seleccionada fue de 8 bits, por lo que el módulo MOSFET recibió valores de entre 0 y 255, siendo 0 cuando la bomba está totalmente apagada y 255 cuando a su máxima potencia. Dentro de Simulink se configuró para que se pueda enviar esos mismos valores:



**Figura 3.6 Envío de datos para manipular Bomba de Agua**

Al momento de estar realizando pruebas se pudo observar que la bomba se mantiene apagada hasta que se le enviaba un valor cercano a 130, que es cuando empezaba a trabajar a baja potencia, por lo que es recomendable empezar desde un valor cercano a 120.

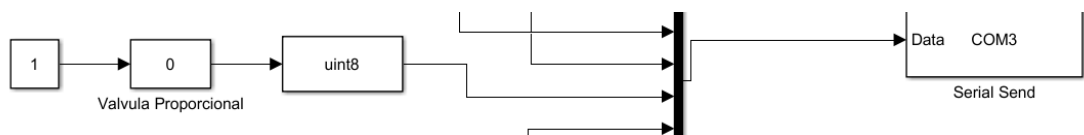
### 3.3.2 Respuesta de la Válvula Proporcional

Para la válvula proporcional se utilizó el DAC interno de la ESP-32, el cual se encargó de convertir una señal digital a analógica. De ahí se consiguieron 0-3.3V, sin embargo, la válvula proporcional solo puede trabajar con una entrada de corriente 4-20 mA. Es gracias a esto que se requirió utilizar un convertidor voltaje a corriente para poder manipularla.

El convertidor tuvo que ser calibrado para que entregara lo que se necesitaba, es decir, 4 mA cuando reciba 0 V y 20 mA cuando reciba 3.3 V. Esto se tradujo al

nivel de apertura de la válvula proporcional, siendo que cuando reciba 4 mA la válvula este totalmente cerrada y cuando reciba 20 mA este totalmente abierta.

El DAC interno de la ESP-32 trabaja con 8 bits de resolución por lo que los valores que envió Simulink estuvieron en el rango 0-255 (0 cerrada y 255 totalmente abierta) como se observa:



**Figura 3.7 Envío de datos para manipular Válvula Proporcional**

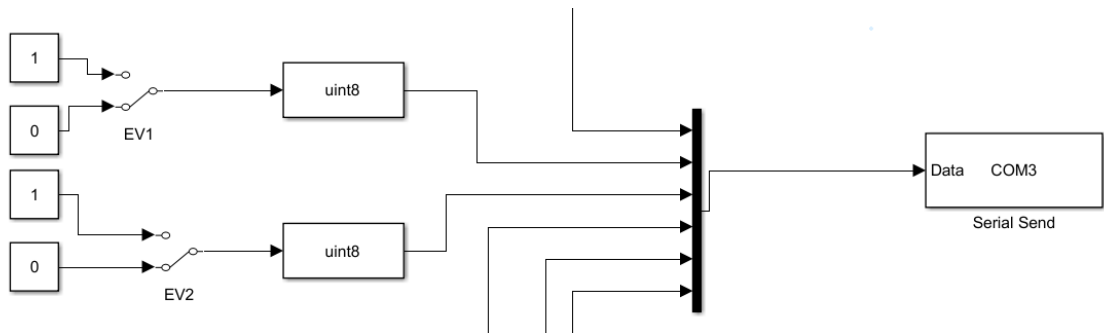
### 3.3.3 Respuesta de las Electroválvulas

En el caso de las electroválvulas se utilizó un módulo relé de 4 canales que permitió manipular el estado de las electroválvulas. Este módulo recibió las señales digitales por parte de la ESP-32 e hizo que trabajaran de la siguiente manera:

```
// Control ON/OFF EV1
if (estadoEV1 == 0) {
    digitalWrite(PIN_EV1, HIGH);
} else {
    digitalWrite(PIN_EV1, LOW);
}

// Control ON/OFF EV2
if (estadoEV2 == 0) {
    digitalWrite(PIN_EV2, HIGH);
} else {
    digitalWrite(PIN_EV2, LOW);
}
```

**Figura 3.8 Código en la ESP-32 para las electroválvulas**

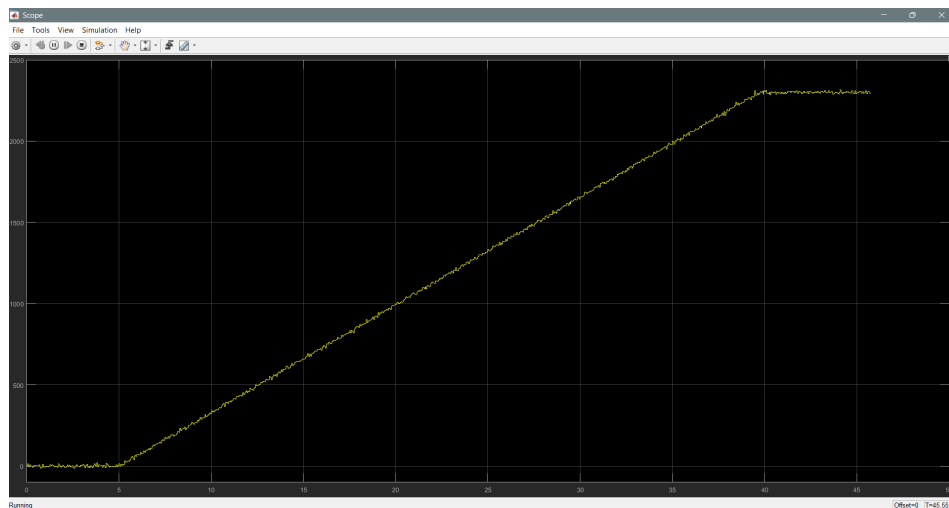


**Figura 3.9 Envío de datos para manipular las electroválvulas**

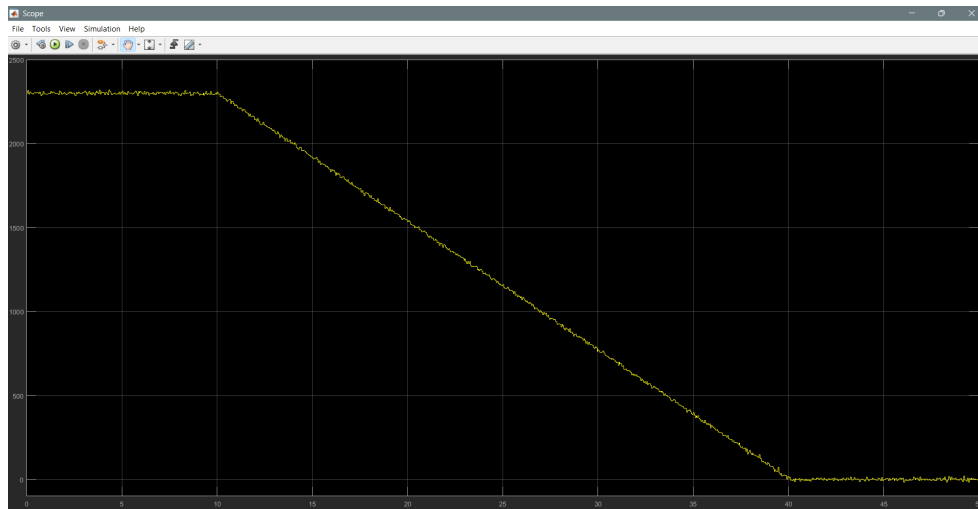
### 3.4 Dinámica del Sistema (Curvas de Reacción)

Se realizaron las pruebas correspondientes para comprobar como variaba el nivel de cada uno de los tanques con la bomba trabajando a su máxima potencia, teniendo en cuenta cada uno de los actuadores que había en cada tanque. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

#### 3.4.1 Comportamiento del nivel en el Tanque 1



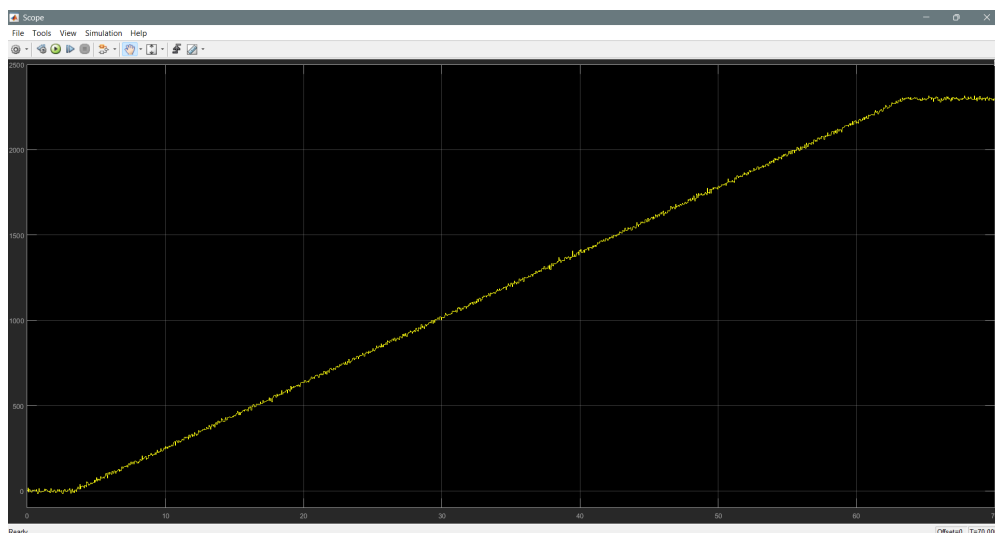
**Figura 3.10 Llenado del Tanque 1**



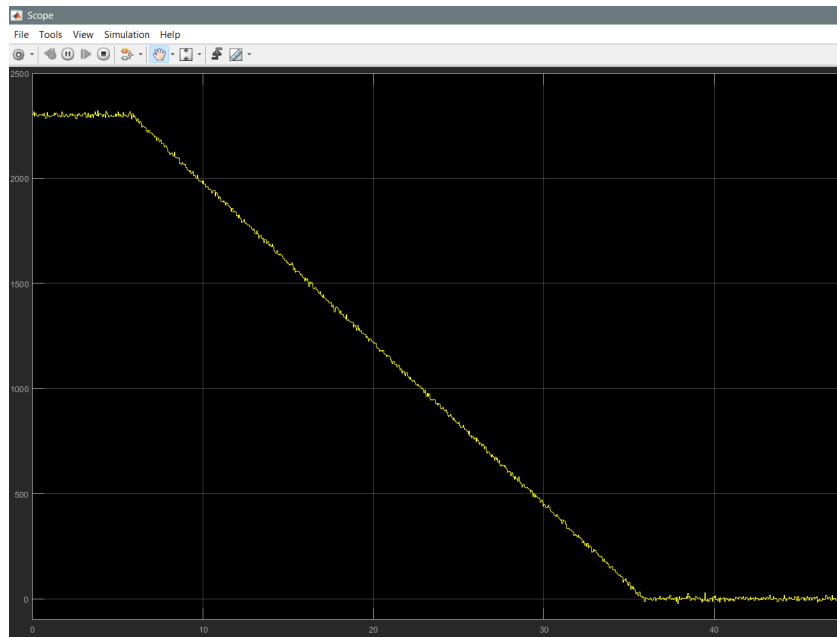
**Figura 3.11 Vaciado del Tanque 1**

El tanque 1 solo tiene como actuador a la bomba por lo que recibió directamente el agua proveniente de la bomba. Se pudo verificar que toma aproximadamente 35 segundos para llenarse completamente. En el caso del vaciado se utilizó la conexión que tiene con el tanque 4 para poder vaciarse, lo que tomo aproximadamente 30 segundos. Tanto para el llenado como para el vaciado la válvula manual que une a los tanques 1 y 2 estaba cerrada, por lo que la única vía de escape fue hacia el tanque 4.

### 3.4.2 Comportamiento del nivel en el Tanque 2



**Figura 3.12 Llenado del Tanque 2**



**Figura 3.13 Vaciado del Tanque 2**

El tanque 2 tiene dos actuadores: la bomba y la válvula proporcional. En este caso se puso la válvula proporcional al 50% para poder observar a cuanto subía el tiempo de llenado del tanque. Se pudo concluir que el llenado es mayor a comparación del tanque 1 ya que se tardó aproximadamente 60 segundos en completarse, basándose en la figura de llenado de este tanque. Esto evidencia la capacidad que tuvo la válvula proporcional al momento de realizar el llenado en lo que respecta al control, ya que gracias a ella se pudo modificar el tiempo de llenado.

En el caso del vaciado se utilizó la conexión que tiene con el tanque 3 para poder vaciarse, lo que tomo aproximadamente 32 segundos. Tanto para el llenado como para el vaciado la válvula manual que une a los tanques 1 y 2 estaba cerrada, por lo que la única vía de escape fue hacia el tanque 3.

### 3.4.3 Comportamiento del nivel en el Tanque 3

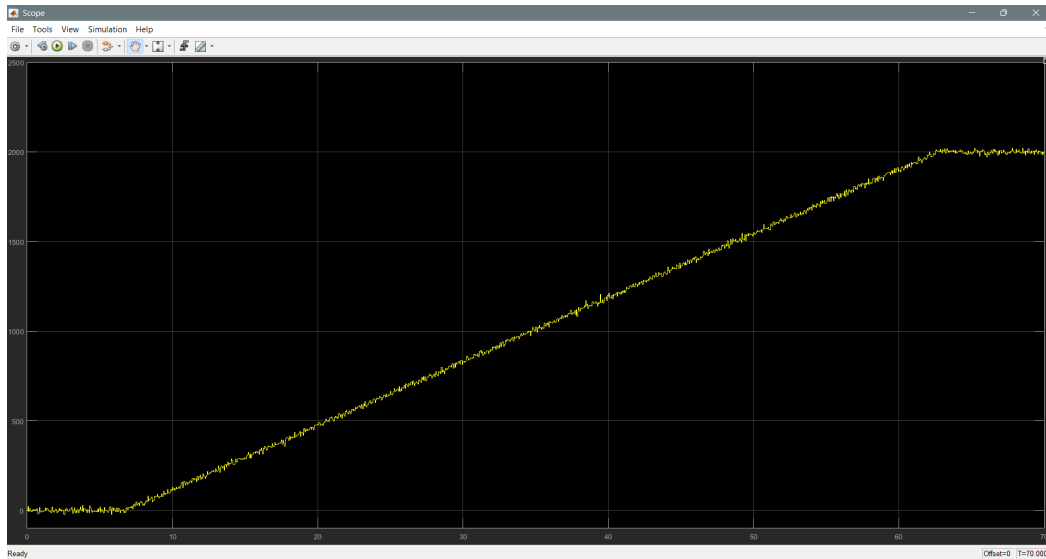


Figura 3.14 Llenado del Tanque 3

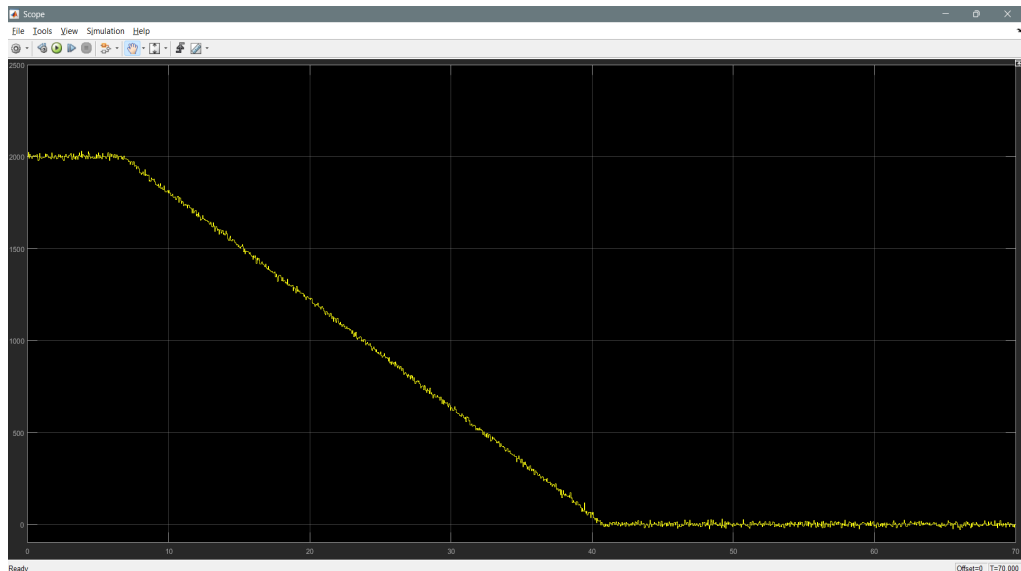


Figura 3.15 Vaciado del Tanque 3

El tanque 3 tiene un actuador principal, el cual es la electroválvula que permite que el agua salga del tanque hacia el reservorio de la planta, por lo que este influye únicamente en el vaciado del tanque.

En los resultados obtenidos se pudo apreciar que el tiempo que tardó en llenarse fue de aproximadamente 55 segundos, puesto que el agua provenía del tanque 2 que mantenía aun la electroválvula de entrada al 50%.

Por otro lado, el vaciado del tanque tardó aproximadamente 35 segundos utilizando la electroválvula que llevaba el agua al reservorio. Tanto para el llenado como para el vaciado la válvula manual que une a los tanques 3 y 4 estaba cerrada, por lo que la única vía de escape fue hacia el reservorio.

### 3.4.4 Comportamiento del nivel en el Tanque 4

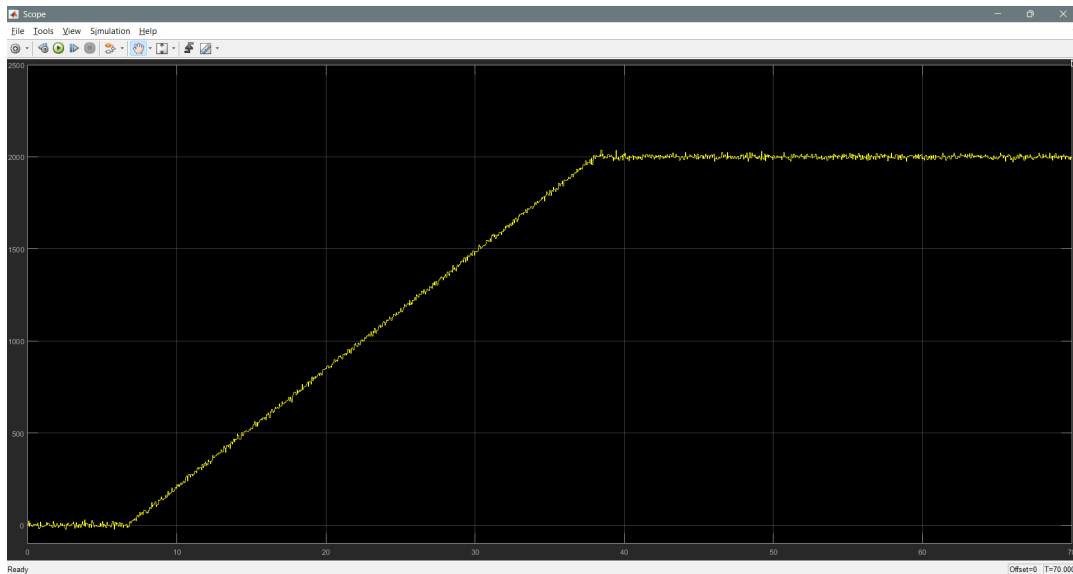


Figura 3.16 Llenado del Tanque 4

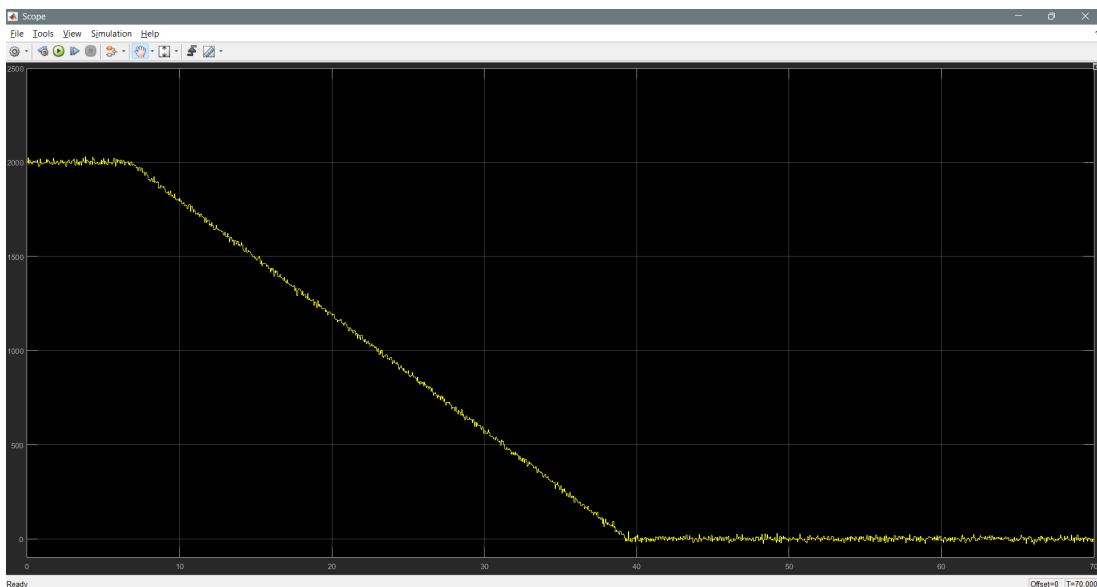


Figura 3.17 Vaciado del Tanque 4

El tanque 4 tiene un actuador principal, el cual es la electroválvula que permite que el agua salga del tanque hacia el reservorio de la planta, por lo que este influye únicamente en el vaciado del tanque.

Se apreció que el tiempo que tardó en llenarse fue de aproximadamente 30 segundos, puesto que el agua provenía del tanque 1 que solo se veía influenciado por la presencia de la bomba de agua.

Por otro lado, el vaciado del tanque tardó aproximadamente 33 segundos utilizando la electroválvula que llevaba el agua al reservorio. Tanto para el llenado como para el vaciado la válvula manual que une a los tanques 3 y 4 estaba cerrada, por lo que la única vía de escape fue hacia el reservorio.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se llegó a la conclusión de que la integración del microcontrolador ESP-32 con MATLAB/Simulink se realizó de manera satisfactoria mediante el uso de la Comunicación Serial. El sistema actualizado no solo cumple con requisitos de viabilidad económica y técnica, sino que también otorga una planta base en la que se podrá realizar la incorporación de métodos de control, lo que beneficiará a usuarios que realicen prácticas en ella.
- Se logró implementar correctamente una interfaz de comunicación bidireccional entre el microcontrolador ESP-32 y el entorno de MATLAB/Simulink. Es posible el envío de comando de control y la recepción de variables físicas de todos los tanques al mismo tiempo, cumpliendo con un nivel de velocidad y estabilidad apropiados para el análisis dinámico del sistema.
- Se creó una guía de práctica destinada a los alumnos para que puedan estudiar de mejor manera la caracterización de sistemas dinámicos. Esta herramienta permite a los alumnos visualizar el nivel de cada tanque desde Simulink, tanto su llenado como su vaciado, y poder interactuar de manera segura con cada uno de los actuadores que tiene la planta. Además, también se mostraron las configuraciones que tiene la planta en relación con la cantidad de tanques a utilizar, lo que beneficia el aprendizaje progresivo.
- La actualización de la planta se realizó correctamente utilizando los nuevos componentes electrónicos, como lo son la válvula proporcional o los sensores de presión industriales, que asemejan más la planta a un entorno de tipo industrial.

### 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar estrategias de control como PID o Control Difuso para fortalecer aún más el conocimiento sobre los Sistemas de Control.

- A pesar de que la comunicación serial funciona correctamente, es recomendable explorar otras opciones compatibles con la ESP-32 como lo es TCP/IP, lo que permitirá controlar la planta de manera remota.
- Es recomendable aplicar estrategias para poder reducir el ruido que tienen las señales provenientes de los sensores, entre estas estrategias, se puede incorporar condensadores de desacoplo, los cuales permiten atenuar perturbaciones de alta frecuencia y transitorios indeseados.

# BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez, L., & Andrés, D. (2017). *Desarrollo De Un Prototipo Para Pruebas De Válvulas Proporcionales Oleohidráulicas*. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6062/6/L%c3%b3pezRodr%c3%adguezDanielAndr%c3%a9s2017.pdf>
- Larios, E. (2023, 14 octubre). *Implementación del control PID en el nivel de un Tanque*. Medium. <https://medium.com/@eder88559/implementaci%C3%B3n-del-control-pid-en-el-nivel-de-un-tanque-23827c5acefa>
- Simmonds-Mendoza, A., Cabrera-Londoño, N., Berdugo-Barandica, N., Roldán-Mckinley, J., & Yime-Rodríguez, E. (2018). *Implementación de control PID de nivel en laboratorio usando PLC Siemens S7-300*. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553756965016/html>
- Control de Nivel. (2024, diciembre 18). *Control de nivel. Medición y Control SAS*. <https://medicionycontrol.com.co/control-de-nivel>
- Caipa-Roldán, J. F., Salamanca, J. M., & Rodríguez-Herrera, J. L. (2010). *Control digital de nivel para sistema de tanques interconectados mediante servo-válvula*. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 10(1), 55-63. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6096099.pdf>
- Carvallo, S., & Zambrano, J. (2023). *Diseño e implementación de un prototipo a escala de una planta de fluidos para el laboratorio de sistemas de control y el desarrollo de prácticas de laboratorio* [Proyecto de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral]
- MathWorks. (s. f.). *OPC UA – MATLAB & Simulink*. Recuperado el 22 de octubre de 2025, de <https://la.mathworks.com/discovery/opc-ua.html>
- OPC Foundation. (2013, abril 26). *Unified Architecture (OPC UA)*. Recuperado de <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
- Hashemi-Pour, C. & Lutkevich, B. (2024, August 12). *What is a Microcontroller? Definition from TechTarget*. TechTarget. Recuperado de <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller>
- Krohn, M. (2022, mayo 6). *What is OPC UA? A practical introduction*. *OPC Router – The Communication Middleware*. <https://www.opc-router.com/what-is-opc-ua/>

- Espressif Systems. (2025). *ESP32 datasheet (Version 3.4)* [Datasheet]. [https://documentation.espressif.com/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf)
- Boonmeeruk, P. (2024). *Cost-Effective IIoT Gateway Development Using ESP32 for IIoT Systems*. *Engineering Journal*, 28(4), 93–104.\* <https://engj.org/index.php/ej/article/view/4584/1362>
- A4BEE. (2023, marzo 13). *Modern communication protocols in Industry 4.0 — OPC UA protocol support in embedded systems*. *Medium*. <https://medium.com/a4bee/modern-communication-protocols-in-industry-4-0-opc-ua-protocol-support-in-embedded-systems-7f21b98c014c>
- Lin, S. (2023). *MatPSST: A Matlab/Simulink-based power system simulation toolbox*. *IET Generation, Transmission & Distribution*. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12805>
- Chokkadi, S., & Bandyopadhyay, R. (Eds.). (2023). *Smart Sensors Measurement and Instrumentation: Select Proceedings of CISCON 2021*. Springer.
- Aboelhassan, A., Abdelgeliel, M., Zakzouk, E. E., & Galea, M. (2020). *Design and Implementation of Model Predictive Control Based PID Controller for Industrial Applications*. *Energies*, 13(24), 6594. <https://doi.org/10.3390/en13246594>
- Juneja, P. K., Sunori, S. K., Sharma, A., Pathak, H., Joshi, V., & Bhasin, P. (2021). *A Review on Control System Applications in Industrial Processes*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1022(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1022/1/012010>
- Altuglas International. (2017). *Fabrication guidelines for Altuglas acrylic sheet*. Altuglas Technical Data.
- ASTM International. (2018). *ASTM D4802-16: Standard specification for poly(methyl methacrylate) sheet*. ASTM International. <https://www.astm.org/d4802-16.html>

- Crawford, R. J., & Martin, P. J. (2020). *Plastics engineering* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Santos, S., & Santos, S. (2025, 24 marzo). ESP32 UART - Serial Communication, Send and Receive Data (Arduino IDE) | Random Nerd Tutorials. Random Nerd Tutorials. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-uart-communication-serial-arduino/#intro-uart>
- Giraldo, S. A. C. (2023, 3 mayo). Comunicación Serial Arduino Simulink/Matlab. Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-embedidos/arduino/comunicacion-serial-arduino-simulink-matlab/>
- DIN. (2013). *DIN 16927: Adhesive bonding of thermoplastics*. Deutsches Institut für Normung.
- Evonik Industries AG. (2012). *Acrylic sheet fabrication manual: Handling, machining, bonding and forming*. Evonik Industries. <https://www.acrylite.co>
- ISO. (2015). *ISO 7823-1: Plastics — Poly(methyl methacrylate) sheets — Types, dimensions and characteristics*. International Organization for Standardization.
- Strong, A. B. (2006). *Plastics: Materials and processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Martínez, D. (2025, 10 abril). Comunicaciones industriales: una guía completa de aplicaciones y usos. Venco Electrónica. <https://www.vencoel.com/comunicaciones-industriales-una-guia-completa-de-aplicaciones-y-usos/>
- Campbell, S. (2024, noviembre 11). Basics of UART Communication. Circuit Basics. <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>
- IPS Corporation. (2020). *Weld-On® 3: Low VOC acrylic plastic cement (Technical data sheet)*. <https://www.ipsadhesives.com>

# ANEXOS

## Código de la ESP-32:

```
// =====  
// CÓDIGO COMPLETO PARA CONTROL MANUAL - PLANTA  
// =====  
  
float tiempo = 0; // Variable para simular el paso del tiempo  
byte bf_tx[10];  
byte bf_rx[6];  
int16_t n1 = 0;  
int16_t n2 = 0;  
int16_t n3 = 0;  
int16_t n4 = 0;  
  
const int PIN_EV1 = 14; // Válvula / Actuador  
const int PIN_EV2 = 12; // Válvula / Actuador  
const int PIN_SENSOR_TANQUE1 = 35; // Sensor de Presión Tanque 1  
const int PIN_SENSOR_TANQUE2 = 32; // Sensor de Presión Tanque 2  
const int PIN_SENSOR_TANQUE3 = 39; // Sensor de Presión Tanque 3  
const int PIN_SENSOR_TANQUE4 = 34; // Sensor de Presión Tanque 4  
  
const int PIN_VP = 25; // Canal DAC1 para Valvula Proporcional  
  
const int PIN_BOMBA = 17; //PIN correspondiente a la Bomba  
  
// --- CONFIGURACIÓN PWM ---  
const int freq = 2000; //  
const int canalPWM = 0; // Canal 0  
const int resolucion = 8; // 8 bits (0-255)
```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  ledcSetup(canalPWM, freq, resolucion);
  ledcAttachPin(PIN_BOMBA, canalPWM);
  ledcWrite(canalPWM, 0); // Arranca apagada

  pinMode(PIN_SENSOR_TANQUE1, INPUT);
  pinMode(PIN_SENSOR_TANQUE2, INPUT);
  pinMode(PIN_SENSOR_TANQUE3, INPUT);
  pinMode(PIN_SENSOR_TANQUE4, INPUT);
  pinMode(PIN_EV1, OUTPUT);
  pinMode(PIN_EV2, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_EV1, LOW);
  digitalWrite(PIN_EV2, LOW);

  dacWrite(PIN_VP, 0);
}

void loop() {
  // -----
  // 1. RECEPCIÓN DE ÓRDENES (Simulink -> ESP32)
  // -----
  if (Serial.available() >= 3) {

    // Verifica si la cabecera es 'V' (86)
    if (Serial.peek() == 86) {

      Serial.readBytes(bf_rx, 6);
      int estadoEV1 = bf_rx[1];
      int estadoEV2 = bf_rx[2];
      int apertura = bf_rx[3];
    }
  }
}

```

```

int potenciaBomba = bf_rx[4]; // 0-255

ledcWrite(canalPWM, potenciaBomba); // Aplica PWM

// Asignacion de valor para Valvula Proporcional
dacWrite(PIN_VP, apertura);

// Control ON/OFF EV1
if (estadoEV1 == 0) {
    digitalWrite(PIN_EV1, HIGH); // Válvula ABIERTA
} else {
    digitalWrite(PIN_EV1, LOW); // Válvula CERRADA
}

// Control ON/OFF EV2
if (estadoEV2 == 0) {
    digitalWrite(PIN_EV2, HIGH); // Válvula ABIERTA
} else {
    digitalWrite(PIN_EV2, LOW); // Válvula CERRADA
}

} else {
    Serial.read(); // Limpiar basura si no es cabecera
}
}

// -----
// 2. LECTURA DE SENSORES (ESP32 -> Simulink)
// -----

// En lugar de leer una sola vez, se lee 10 veces y promedia.
// Esto elimina el "ruido" y estabiliza el valor en Simulink.

```

```

    n1 = -0.8*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE3, 10))+2634; //Sensor de Voltaje
Tanque 3
    n2 = -0.8*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE4, 10))+2634; //Sensor de Voltaje
Tanque 4
    n3=4.8421*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE1, 10)); //Sensor de Corriente
Tanque 1
    n4=4.946*(leerPromedio(PIN_SENSOR_TANQUE2, 10)); //Sensor de Corriente
Tanque 2
    Serial.println(n4);

    tiempo += 0.1;

    // Empaquetado de datos
    bf_tx[0] = 'R';          // Cabecera
    bf_tx[1] = (n1 >> 8) & 0xFF; // Byte Alto n1
    bf_tx[2] = n1 & 0xFF;      // Byte Bajo n1
    bf_tx[3] = (n2 >> 8) & 0xFF; // Byte Alto n2
    bf_tx[4] = n2 & 0xFF;      // Byte Bajo n2
    bf_tx[5] = (n3 >> 8) & 0xFF; // Byte Alto n3
    bf_tx[6] = n3 & 0xFF;      // Byte Bajo n3
    bf_tx[7] = (n4 >> 8) & 0xFF; // Byte Alto n4
    bf_tx[8] = n4 & 0xFF;      // Byte Bajo n4
    bf_tx[9] = 10;            // Terminador (\n)

    Serial.write(bf_tx, 10);

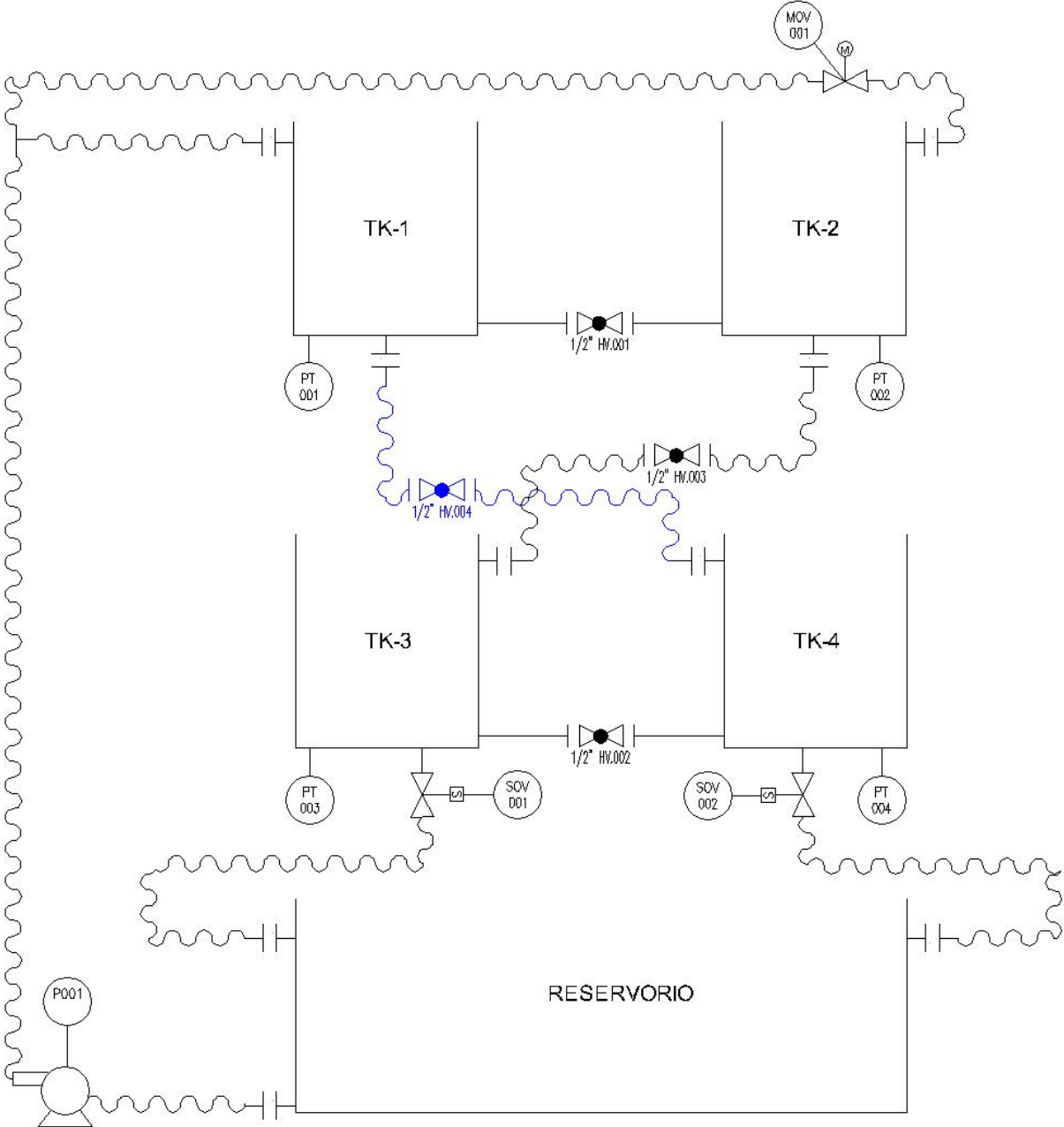
}

// -----
// FUNCIÓN AUXILIAR

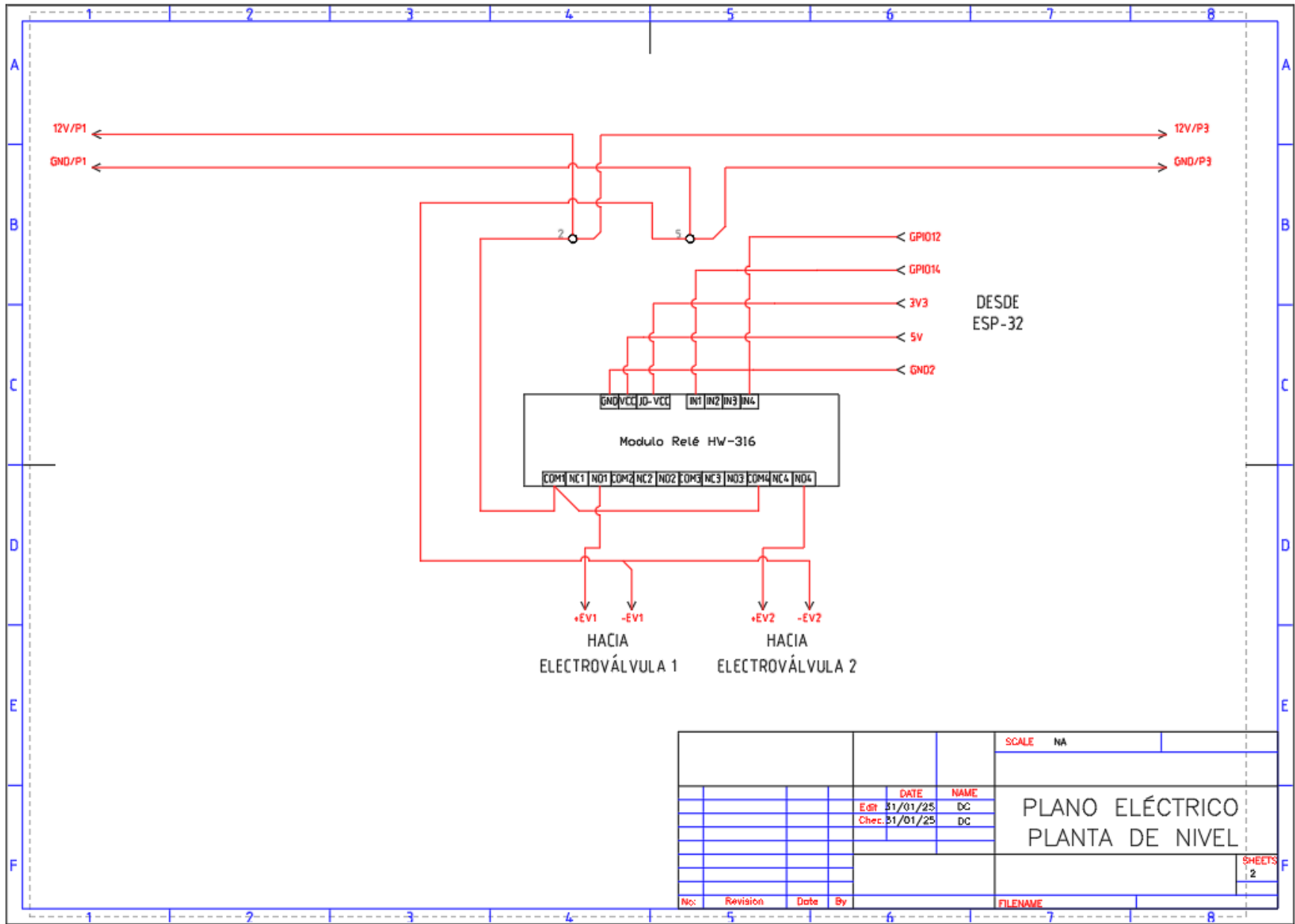
```

```
// -----  
int leerPromedio(int pin, int muestras) {  
    long suma = 0;  
    for (int i = 0; i < muestras; i++) {  
        suma += analogRead(pin);  
        delay(1); // Pequeña pausa de 1ms para estabilizar el ADC  
    }  
    return (int)(suma / muestras);  
}
```

**PLANO 1 Plano P&ID de la planta de nivel**

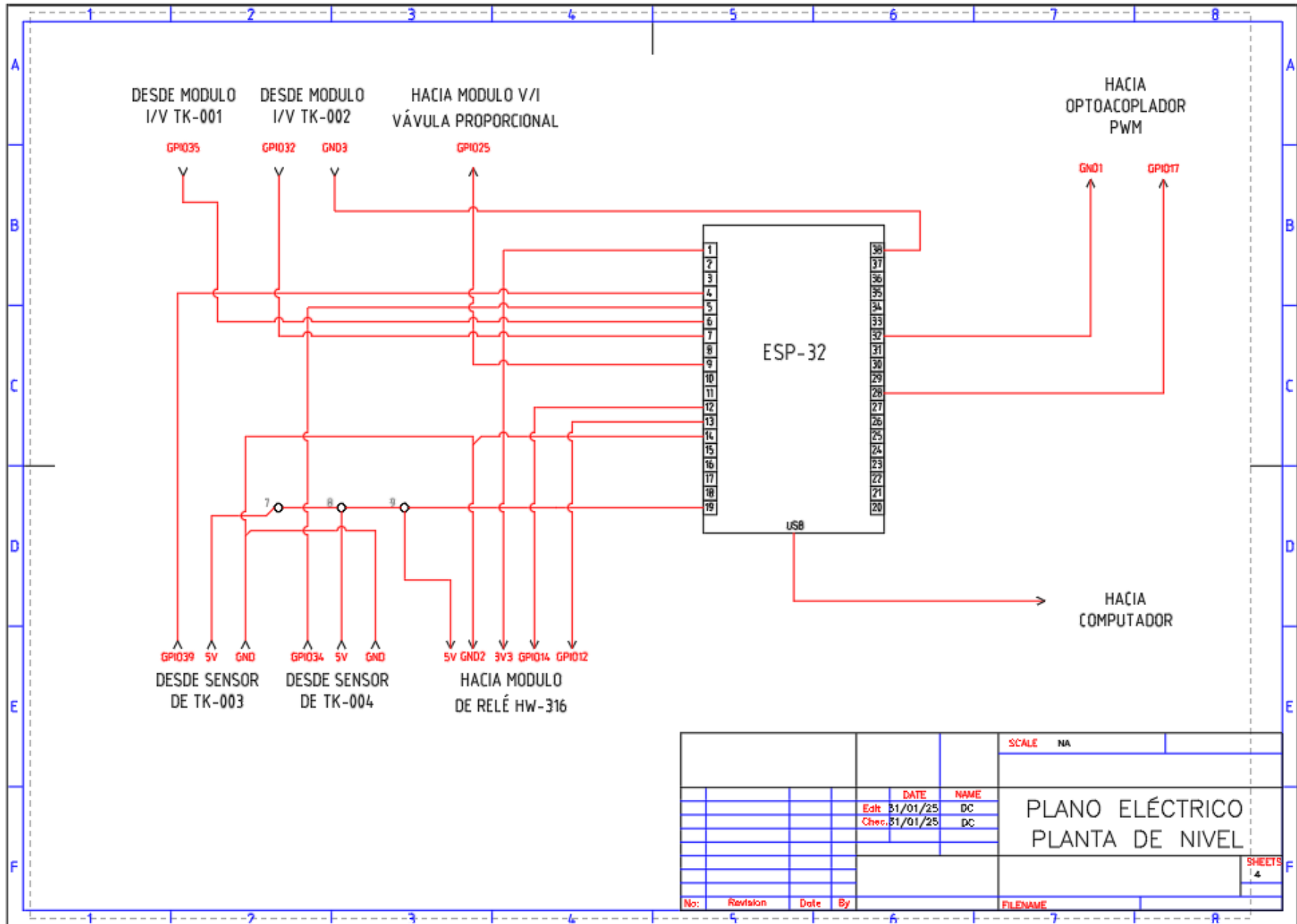






		SCALE		NA
		DATE	NAME	
		31/01/25	DC	
		31/01/25	DC	
		PLANO ELÉCTRICO PLANTA DE NIVEL		
		SHEETS 2		
No:	Revision	Date	By	FILENAME





		SCALE		NA
		DATE	NAME	PLANO ELÉCTRICO PLANTA DE NIVEL
		Edt: 31/01/23	DC	
		Chc: 31/01/23	DC	
No:	Revision	Date	By	FILENAME
				SHEETS 4