


Olivera Díaz Hilder Paiva García Dahana Milagros

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO DE CONTROL DE FLUJO Y NIVEL DE LÍQUIDO, PARA LA UNIVER...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3505967070

Fecha de entrega

13 mar 2026, 9:15 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

13 mar 2026, 9:32 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Hilder_Olivera_D_az_Informe._-_DAHANA_MILAGROS_PAIVA_GARCIA.pdf

Tamaño del archivo

7.6 MB

137 páginas

27.425 palabras

160.057 caracteres



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera

Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería






3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera

Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

Fuentes principales

- 3% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	naylampmechatronics.com	<1%
2	Internet	hdl.handle.net	<1%
3	Internet	dspace.esoch.edu.ec	<1%
4	Internet	www.coursehero.com	<1%
5	Internet	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
6	Trabajos del estudiante	Escuela Politecnica Nacional	<1%
7	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
8	Internet	repository.uamerica.edu.co	<1%
9	Internet	renati.sunedu.gob.pe	<1%
10	Trabajos del estudiante	Hogeschool Inholland	<1%
11	Internet	ri.ues.edu.sv	<1%

12	Internet	fabacademy.org	<1%
13	Internet	dspace.unitru.edu.pe	<1%
14	Trabajos del estudiante	Consortio CIXUG	<1%
15	Internet	repositorio.uan.edu.co	<1%
16	Internet	www.slideshare.net	<1%
17	Trabajos del estudiante	Middlesex University	<1%
18	Trabajos del estudiante	Universidad de Lima	<1%
19	Trabajos del estudiante	University of Greenwich	<1%
20	Trabajos del estudiante	University of Lincoln	<1%
21	Internet	repositorio.untrm.edu.pe	<1%
22	Internet	tesis.ucsm.edu.pe	<1%
23	Trabajos del estudiante	Universidad Católica Boliviana "San Pablo"	<1%
24	Internet	github.com	<1%
25	Internet	prezi.com	<1%

26	Trabajos del estudiante	Escuela Superior Politécnica del Litoral	<1%
27	Trabajos del estudiante	ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey	<1%
28	Internet	repositorio.ulead.edu.ec	<1%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA



IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO DE
CONTROL DE FLUJO Y NIVEL DE LÍQUIDO, PARA LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

INFORME FINAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

AUTORES : Egr. OLIVERA DÍAZ HILDER
Egr. PAIVA GARCÍA DAHANA MILAGROS

ASESOR : MSc. Ing. PINEDO NAVA HENRY OSWALDO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

JAÉN – PERÚ, 2026

ÍNDICE

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Antecedentes	10
1.2. Realidad problemática	12
1.3. Planteamiento del problema.....	13
1.3.1. Pregunta Central de Investigación	15
1.4. Justificación	15
1.5. Objetivos.....	16
1.5.1. Objetivo General.....	16
1.5.2. Objetivos específicos	16
II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
2.1. Objeto de estudio	17
2.2. Ubicación del área de estudio	17
2.3. Tipo de investigación.....	18
2.4. Diseño metodológico	19
2.5. Base teórica.....	21
2.5.1. Fundamentos de Control de Flujo y Nivel de Líquidos.....	21
2.5.1.1. Importancia en el contexto educativo e industrial	22
2.5.1.2. Variables del proceso	22
2.5.1.3. Principios de la mecánica de fluidos aplicados.....	23
2.5.1.4. Estrategias de control aplicables.....	24
2.5.2. Fundamentos de control automático	24
2.5.3. Variables y Componentes de un Sistema de Control.....	27
2.5.4. Modelamiento matemático.....	31

7

11

2.5.5.	Componentes y Arquitectura del Sistemas Didáctico.....	34
2.6.	Materiales.....	35
2.6.1.	Elementos Hidráulicos	35
2.6.2.	Equipos y actuadores	38
2.6.3.	Sensores e instrumentación.....	42
2.6.4.	Controladores electrónicos.....	46
2.6.5.	Interfaces de comunicación.....	48
2.6.6.	Componentes eléctricos y complementarios.....	52
2.6.7.	Estructura y Soporte Mecánico	53
2.7.	Método	54
2.8.	Procedimiento	56
2.9.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	71
2.10.	Registro y análisis de datos obtenidos	72
III.	RESULTADOS.....	75
3.1.	OE1: Análisis de principios teóricos de control de flujo y nivel.....	75
3.2.	OE2: Diseño estructural y electrónico de los componentes	77
3.3.	OE3: Manufactura de modulo y ensamble de tarjetas electrónicas	81
3.4.	OE4: Evaluación de mediciones teóricas versus sistema real	85
IV.	DISCUSIÓN	101
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
	AGRADECIMIENTO.....	113
	ANEXOS	114

21

7

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Especificaciones técnicas de la bomba de agua	39
Tabla 2	Especificaciones técnicas del driver mosfet.....	40
Tabla 3	Especificaciones técnicas del caudalímetro	42
Tabla 4	Especificaciones técnicas del sensor de ultrasónico	43
Tabla 5	Especificaciones técnicas Sensor de presión.....	44
Tabla 6	Especificaciones técnicas de DHT22	45
Tabla 7	Especificaciones técnicas de Arduino UNO R.....	47
Tabla 8	Especificaciones técnicas del Arduino mini Pro	48
Tabla 9	Especificaciones Técnicas del conversor serial	49
Tabla 10	Especificaciones técnicas del conversor XL405	50
Tabla 11	Especificaciones técnicas de la pantalla HMI.....	51
Tabla 12	Tiempo de llenado a diferente potencia de la bomba.....	57
Tabla 13	Tabla de asignación de pines.....	69
Tabla 14	Caudales y voltajes en función del PWM	87
Tabla 15	Consolidado de datos	88
Tabla 16	Caudales de salida promedio.....	94
Tabla 17	Consolidado de datos de caudales de salida.....	94
Tabla 18	Set Point y variación de caudal	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de ubicación geográfica de ejecución de la tesis	18
Figura 2	Lazo abierto de control	25
Figura 3	Lazo cerrado de control	26
Figura 4	Representación de la señal PWM	30
Figura 5	Esquematización del vaciado.....	33
Figura 6	Tubos de PVC de ½ pulgada	35
Figura 7	Codos de PVC de ½ pulgada	35
Figura 8	Válvula de globo	36
Figura 9	Válvula check	36
Figura 10	Tanque inferior y superior puesto en la estructura	37
Figura 11	Tubo metálico galvanizado	38
Figura 12	Bomba de agua.....	39
Figura 13	Driver mosfet dual AOD4184A.....	40
Figura 14	Válvula solenoide NC baja presión	41
Figura 15	Especificaciones técnicas de la válvula solenoide.....	41
Figura 16	Sensor de flujo de agua de 1/2 " YF-S201.....	42
Figura 17	Sensor ultrasónico JSN-SR04T	43
Figura 18	Sensor de presión	44
Figura 19	Sensor de temperatura.....	45
Figura 20	Placa de desarrollo Arduino UNO	46
Figura 21	Arduino pro mini	48
Figura 22	Conversor RS485 a serial TTL	49
Figura 23	Conversor de nivel 5A XL4005.....	50
Figura 24	Interfaz HMI	51
Figura 25	Fuente de alimentación	52
Figura 26	Cables Dupont.....	53

Figura 27 Esquema de Vaciado de tanque elevado.....	55
Figura 28 Diseño 3D del sistema y accesorios.....	59
Figura 29 Diagrama de Sistema hidráulico simulado	60
Figura 30 Diseño de la placa de control.....	61
Figura 31 Diseño flat CAM listo para imprimir.....	62
Figura 32 Modelo referencial de la ubicación de los tanques	65
Figura 33 Programación en la plataforma Arduino IDE 2.3.6	66
Figura 34 Estructura mecánica	67
Figura 35 Elaboración de PCB.....	68
Figura 36 Dimensiones del tanque	75
Figura 37 Diseño 3D de la estructura de soporte comparado con lo fabricado	77
Figura 38 Diseño 3D de los tanques de agua.	77
Figura 39 Código en Python.....	78
Figura 40 Esquemización del diseño del sistema.....	78
Figura 41 Diagrama de conexiones de control.....	79
Figura 42 Diagrama de conexiones de la pantalla.....	80
Figura 43 Soldado y manufactura de estructura metálica	81
Figura 44 Recorte de acrílico	81
Figura 45 Base de tanque con acrílico acondicionado	82
Figura 46 Módulo final manufacturado	82
Figura 47 Fabricación de PCB	83
Figura 48 Placa PCB	83
Figura 49 Vista de datos en tiempo real.....	84
Figura 50 Esquema de modulo implementado.....	84
Figura 51 Caracterización de la bomba.....	85
Figura 52 Modelo matemático de carga	88
Figura 53 Medición real de carga.....	89
Figura 54 Comparación de modelos.....	90
Figura 55 Desviación y error al 100 %	91
Figura 56 Desviación y error al 85 %	92
Figura 57 Desviación y error al 70 %	92
Figura 58 Comparación Teórica y Experimental	93
Figura 59 Modelamiento matemático para la descarga.....	95
Figura 60 Código para el modelamiento en descarga	95
Figura 61 Medición real	96
Figura 62 Comparación de descarga	96

23

RESUMEN

La investigación desarrolló, implementó y validó experimentalmente un prototipo didáctico para el control de flujo y nivel de líquidos, orientado a fortalecer la formación de estudiantes de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Surge como respuesta a la limitada disponibilidad de módulos educativos que permitan experimentar modelos matemáticos y compararlos con sistemas reales. La metodología aplicó un enfoque de desarrollo tecnológico experimental, diseñando una arquitectura de control de bajo costo y fácil acceso mediante hardware abierto Arduino IDE y comunicación RS485-TTL. Se estableció un modelo matemático de primer orden para describir la dinámica del sistema de nivel, constituyendo la base para la planificación y el componente didáctico del prototipo. El resultado principal es un prototipo funcional y económico, clasificado como prueba de concepto. Su validación experimental incluyó la implementación de un control ON/OFF en lazo cerrado, demostrando que el sistema mantiene el nivel dentro de una banda de histéresis incluso ante variaciones del punto de consigna. Se valida que el modelo teórico se ajusta al comportamiento real del sistema, aunque intrínsecamente siempre van a existir desviaciones atribuibles a la aleatoriedad inevitable debida al ruido. Se concluye que constituye una herramienta eficaz para reforzar la comprensión de sistemas de control realimentados, y modelado matemático a un sistema real, que aporta un recurso académico didáctico sostenible para la UNJ.

Palabras clave: Prototipo didáctico, Control de nivel, Control de flujo, modelado matemático, Arduino, Automatización de bajo costo, Control ON/OFF.

ABSTRACT

This research developed, implemented, and experimentally validated a didactic prototype for liquid flow and level control, aimed at strengthening the training of Mechanical and Electrical Engineering students. The project arises in response to the limited availability of educational modules that allow for the experimentation with mathematical models and their comparison with real-world systems.

Methodologically, an experimental technological development approach was applied, designing a low-cost and accessible control architecture using open-source Arduino IDE hardware and RS485-TTL communication. A first-order mathematical model was established to describe the dynamics of the level system, forming the basis for the planning and the didactic component of the prototype.

The main result is a functional and economical prototype classified as a proof of concept. Its experimental validation included the implementation of a closed-loop ON/OFF control, demonstrating that the system maintains the level within a hysteresis band even amid setpoint variations. It is validated that the theoretical model aligns with the real behavior of the system, although inherent deviations attributable to unavoidable randomness due to noise will always exist. It is concluded that this constitutes an effective tool for reinforcing the understanding of feedback control systems and mathematical modeling applied to real systems, providing a sustainable didactic academic resource for the UNJ.

Keywords: Didactic prototype, Level control, Flow control, Mathematical modeling, Arduino, Low-cost automation, ON/OFF control.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la enseñanza de la ingeniería demanda un enfoque cada vez más práctico, orientado a la aplicación de conceptos teóricos en entornos reales. En particular, el área de control de procesos, que comprende el monitoreo y regulación de variables como flujo y nivel de líquidos, constituye un pilar fundamental en diversas ramas de la industria moderna, entre ellas la química, el tratamiento de aguas y la manufactura. Sin embargo, en muchos programas académicos persiste una brecha entre la teoría y la práctica, debido a la limitada disponibilidad de equipos didácticos especializados que permitan a los estudiantes experimentar directamente con los principios del modelado matemático de los sistemas reales, que permita optimizar las labores de automatización y control.

Los equipos industriales dedicados a controlar procesos suelen tener un elevado costo que impide su adquisición por parte de los entes formativos. Además, estos sistemas necesitan, en general, tanto mantenimiento especializado como espacios adecuados, que no suelen encontrarse en las universidades. Por otro lado, la complejidad que posee un proceso industrial real es grande, lo que puede suponer que estudiantes que están todavía en una fase temprana del proceso de formación profesional puedan sentirse desbordados con estos sistemas. La complejidad de los sistemas a gran escala en los que se interrelacionan distintas variables y vigentes estrictos protocolos de seguridad no suelen ser los más indicados para el aprendizaje gradual y para la experimentación que exige un proceso educativo.

La relevancia del control de procesos en la formación del ingeniero moderno es innegable. En un entorno industrial que tiende a ser cada vez más automatizado, en el que la optimización del recurso, la eficiencia energética y la calidad del producto final dependen directamente de un control preciso de las variables críticas, la capacidad de entender estos principios de control es una competencia básica del futuro ingeniero. Un futuro ingeniero no solo debe

ser capaz de empezar a conocer las nociones básicas de control automático, sino que también debe desarrollar la capacidad de diseñar, implementar y optimizar sistemas de control en la práctica.

Así también el desarrollo de competencias prácticas en el control de procesos favorece particularmente el desarrollo del pensamiento crítico y de las habilidades para resolver problemas. Cuando los estudiantes tienen la oportunidad de ver cómo los cambios en los parámetros de control afectan el comportamiento mismo del sistema, se produce un desarrollo de una cierta intuición ingenieril que difícilmente podría alcanzarse en solitario a partir de los elementos teóricos.

En este contexto aparece la necesidad de desarrollar herramientas didácticas innovadoras que sean capaces de reducir la brecha que existe entre la formación académica y las exigencias de la realidad productiva de nuestros tiempos. Las cuales deben ser viables económicamente, versátiles en sus aplicaciones pedagógicas y que sean suficientemente robustas para soportar el uso intensivo en el contexto de la formación académica. La presente tesis se enmarca precisamente en esta problemática, proponiendo el diseño y desarrollo de un sistema didáctico de control de procesos que permita a los estudiantes de ingeniería poder experimentar sobre los principios del funcionamiento de la automatización industrial. A través de estos elementos, se establece un puente eficiente entre el frío conocimiento teórico de los aspectos básicos y la posibilidad de facilitar a los futuros profesionales un mejor aprendizaje en relación con lo que va a ser su vida laboral.

1.1. Antecedentes

A nivel internacional, distintas investigaciones han planteado soluciones a esta problemática mediante el diseño e implementación de prototipos didácticos. Con el objetivo de desarrollar un prototipo de planta distribuidora de agua con sistema SCADA en LABVIEW, Avendaño & Cabarcas (2017) evaluaron el funcionamiento óptimo de dos tanques interconectados y aportando una plataforma educativa para futuras aplicaciones, el sistema utiliza una motobomba para transferir agua desde un depósito principal a un tanque distribuidor, y electroválvulas para suministrar a los consumidores. La investigación incluyó la selección y calibración de electrobombas, válvulas y sensores ultrasónicos, junto con el desarrollo de un sistema SCADA en LABVIEW conectado mediante Arduino a través de interfaz serial. Los resultados demostraron un funcionamiento óptimo con control preciso de llenado e interpretación correcta de datos sensoriales.

Asimismo, se han reportado otros estudios como el de Andy & Guanoluisa (2021) quienes diseñaron e implementaron un módulo experimental para simular procesos de control industrial en los laboratorios de enseñanza superior con el objetivo de proporcionar a los estudiantes un entorno didáctico que les permita practicar y aprender de manera progresiva sobre el control manual y automático de motores, utilizando dispositivos de protección, maniobra, control y fuerza. Las prácticas incluyen desde métodos básicos de control cableado hasta el uso de controladores lógicos programables (PLC) y variadores de frecuencia. Los resultados mostraron que el módulo, compuesto por elementos de control industrial, permite a los estudiantes realizar conexiones y prácticas de forma efectiva, mejorando su comprensión de los sistemas de control industrial. Se concluyó que el diseño del módulo, junto con las guías de prácticas elaboradas, facilita el aprendizaje progresivo y el desarrollo de habilidades prácticas en el área industrial.

Con el objetivo de capacitar a los estudiantes en el control de procesos, Benítez (2023), diseñó y construyó un módulo destinado al Laboratorio de Procesos Industriales del Departamento de Automatización y Control Industrial, el módulo permite controlar el nivel de líquido en un tanque principal mediante una válvula de globo, accionada por un motor eléctrico de corriente continua, y una bomba que suministra líquido desde un tanque de almacenamiento. El nivel del líquido se mide utilizando un sensor de presión diferencial, que proporciona una salida continua correspondiente al nivel del tanque. Este módulo puede operar en modo manual o automático, y permite la supervisión y adquisición de datos a través de una interfaz gráfica desarrollada con el software INTOUCH. Las acciones de control son gestionadas por un PLC, que procesa las señales de entrada y ejecuta las operaciones necesarias para mantener el nivel deseado de líquido. Como resultado, el módulo provee una herramienta didáctica eficaz que simula escenarios de control industrial, permitiendo a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en un entorno práctico.

De este modo, los resultados obtenidos por Ruíz (2019) y Nolasco (2019), han coincidido en la utilidad de los módulos didácticos como herramientas eficaces para fortalecer el aprendizaje en control y automatización, al integrar sensores, controladores lógicos programables (PLC), interfaces HMI y softwares especializados. Las conclusiones destacan la relevancia de este tipo de formación práctica para enfrentar los desafíos de la digitalización en la industria

En el contexto nacional, Coronado (2024) desarrolló un módulo didáctico con controlador Siemens SIMATIC S7-1200, logrando una plataforma robusta para el aprendizaje del control de procesos. Lo cual se podría replicar en otros lugares, pero debido a limitaciones económicas no se puede hacer al menos por estos autores. No obstante, pese a estos avances, en el Perú aún existen limitaciones significativas en el equipamiento de los laboratorios universitarios, lo que restringe la formación práctica de los estudiantes de ingeniería según Andy

& Guanoluisa (2021). Tal situación se replica en la Universidad Nacional de Jaén, donde la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica carece de un prototipo didáctico que permita simular y controlar procesos de flujo y nivel de líquidos. Esta carencia genera vacíos formativos en asignaturas clave como Mecánica de Fluidos, Electrónica, Instalaciones Industriales y Automatización, limitando la adquisición de competencias aplicadas y reduciendo la competitividad de los egresados en el mercado laboral.

1.2. Realidad problemática

En la formación actual de los ingenieros, la transición del concepto teórico a la implementación práctica es uno de los mayores desafíos pedagógicos. En la Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ), se ha identificado que la enseñanza de la automatización y el control de procesos se ve limitada por la falta de herramientas experimentales de acceso directo. Esta carencia de infraestructura didáctica especializada impide que los estudiantes validen empíricamente leyes físicas y algoritmos de control, generando una brecha entre el saber y el saber hacer.

Actualmente, la ausencia de un prototipo de control de flujo y nivel de líquidos obliga a que el aprendizaje sea predominantemente simulado o teórico. Esta situación restringe el desarrollo de competencias críticas en programación de sistemas embebidos, calibración de sensores y sintonización de controladores en tiempo real. Según Bazán (2023), la falta de herramientas adecuadas impide que los estudiantes adquieran habilidades prácticas esenciales, lo que debilita su perfil profesional frente a un mercado laboral que demanda capacidad de resolución de problemas en entornos físicos reales.

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar un prototipo didáctico que funcione como un laboratorio dinámico. Esta investigación no solo buscó democratizar el acceso a tecnología de calidad mediante una alternativa económica frente a los costosos equipos comerciales, sino también transformar el aula en un espacio de experimentación activa. De este modo, la UNJ podrá garantizar una formación integral, alineada con los estándares globales de educación en ingeniería, preparando a sus egresados para enfrentar desafíos tecnológicos complejos con una base práctica sólida.

1.3. Planteamiento del problema

En el marco de la Cuarta Revolución Industrial, el control automático de variables se ha consolidado como un pilar fundamental para la operatividad de sectores estratégicos como la generación de energía, la petroquímica y la manufactura. En estos entornos, la gestión precisa del flujo y el nivel de líquidos no solo condiciona la eficiencia operativa y la calidad del producto final, sino que resulta determinante para garantizar la seguridad industrial y la sostenibilidad medioambiental. En consecuencia, la tendencia internacional en la formación de ingenieros ha transitado de modelos puramente teóricos hacia metodologías de aprendizaje activo o experimental (hands-on learning), donde la interacción con sistemas reales y prototipos funcionales permite desarrollar competencias críticas en sintonización de controladores y diagnóstico de fallas.

No obstante, a escala latinoamericana, la implementación de laboratorios de automatización avanzados enfrenta severas limitaciones presupuestarias. El elevado costo de adquisición y mantenimiento de equipos didácticos comerciales, los cuales integran hardware propietario como Controladores Lógicos Programables (PLC) y software de supervisión (SCADA) genera una brecha tecnológica significativa. Esta situación obliga a diversas instituciones

educativas a optar por la enseñanza teórica o el uso de simulaciones pasivas, resultando en una formación profesional que no logra satisfacer las demandas actuales del mercado laboral.

Esta problemática se agudiza en el contexto del Perú, específicamente en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ). A pesar de la relevancia del sector agroindustrial y energético para el desarrollo regional, la instrucción académica en asignaturas de control y dinámica de fluidos se apoya predominantemente en modelos abstractos. Esta deficiencia metodológica impide que el estudiante logre una comprensión física de la respuesta dinámica del sistema ante cambios externos. Asimismo, dificulta la transición de la teoría a la práctica, al no permitir la validación de las ecuaciones de balance de masa y energía en escenarios tangibles, ni la sintonización y depuración de algoritmos de control bajo condiciones de operación en tiempo real.

Al analizar los antecedentes y las brechas de conocimiento, se observa que, si bien existen esfuerzos previos para desarrollar módulos de monitoreo de nivel mediante plataformas como LabVIEW y PLC, estos suelen depender de licencias económicamente insostenibles para universidades públicas. Existe, por tanto, un vacío de conocimiento respecto al desarrollo de prototipos que logren integrar la rigurosidad del modelamiento matemático con la accesibilidad del hardware de código abierto (como Arduino) y arquitecturas de comunicación modulares. La falta de un recurso didáctico con estas características en la UNJ produce efectos negativos multidimensionales: debilita el perfil de egreso en el área de automatización, genera una inversión ineficiente de los recursos educativos y prolonga la curva de aprendizaje de los graduados al insertarse en el sector industrial.

Finalmente, el estudio se delimita a la implementación y validación experimental de un prototipo didáctico de control de nivel y flujo, utilizando la plataforma Arduino y un enfoque de control ON/OFF inicial bajo el rigor de las ecuaciones de Bernoulli y balance de masa.

1.3.1. Pregunta Central de Investigación

¿Cómo la implementación de un prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido, basado en hardware de código abierto, permite fortalecer la formación práctica y el desempeño experimental en los estudiantes de ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén?

1.4. Justificación

La implementación de este prototipo didáctico se fundamenta en la imperativa necesidad de cerrar la brecha entre la teoría abstracta y la práctica experimental en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén. En el contexto de la educación superior, para una formación integral en ingeniería, no basta con modelar sistemas en un computador; es imperativo el contacto con procesos físicos. El uso de este prototipo permite que el estudiante enfrente y resuelva desafíos técnicos reales como la interferencia en sensores y la respuesta no lineal de las bombas, habilidades que son imposibles de desarrollar únicamente mediante simulaciones digitales (Fernández, 2021).

Desde una perspectiva pedagógica, este proyecto se justifica como un catalizador para el desarrollo de competencias críticas. Según García & López (2019), la ausencia de herramientas adecuadas en esta unidad académica impide que los estudiantes adquieran habilidades prácticas esenciales, limitando su capacidad para integrar conceptos de control, programación y electrónica en contextos técnicos. Por ello, el prototipo se propone como un laboratorio dinámico diseñado para que el estudiante aprenda haciendo. Al interactuar con un sistema de llenado de tanque real, el estudiante deja de ser un receptor pasivo de información y se convierte en un experimentador capaz de calibrar instrumentación y sintonizar algoritmos de control en tiempo real.

Asimismo, la relevancia institucional de este trabajo radica en la disponibilidad del acceso a recursos tecnológicos. Según Rodríguez & Pérez (2017). Las estaciones de control comerciales suelen ser inaccesibles para instituciones con presupuestos limitados debido a su alto costo. Este prototipo ofrece una alternativa económica y de arquitectura abierta que fomenta la sostenibilidad educativa, permitiendo que la universidad cuente con un módulo replicable y mantenible.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Implementar un prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido para la Universidad Nacional de Jaén.

1.5.2. Objetivos específicos

OE1: Analizar los principios teóricos y técnicos del control de flujo y nivel de líquidos para establecer los requerimientos del prototipo.

OE2: Diseñar estructural y electrónicamente todos los componentes del módulo didáctico de un sistema de llenado de tanque, incorporando sensores, actuadores y un controlador.

OE3: Ensamblar la estructura, las tarjetas electrónicas y todos los componentes del módulo didáctico, incorporando sensores, actuadores y controladores electrónicos y programar los sistemas electrónicos embebidos.

OE4: Evaluar las mediciones del cálculo teórico versus el sistema real para evaluar su precisión y desempeño en escenarios educativos.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

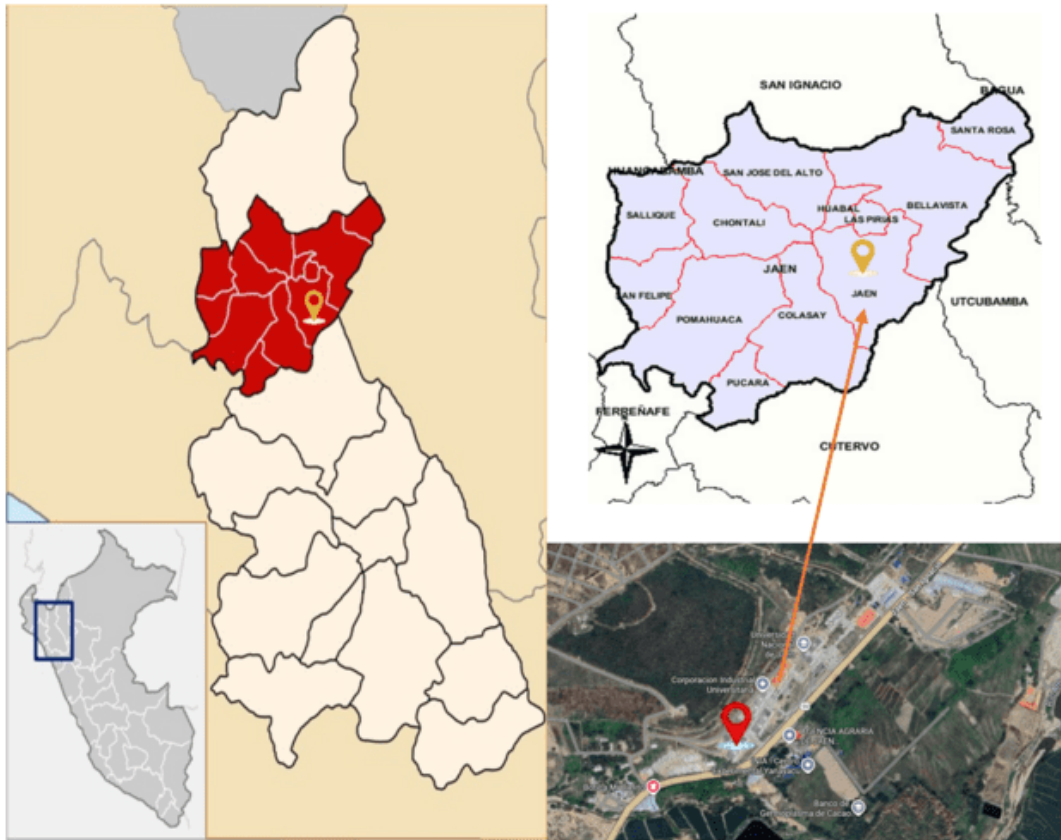
2.1. Objeto de estudio

El objeto de estudio de la presente investigación es la implementación de un prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido para la Universidad Nacional de Jaén, concebido como una herramienta de apoyo práctico, que será muy útil en la enseñanza de la ingeniería. Se centra en analizar, integrar y poner en funcionamiento sensores, actuadores, controladores y sistemas de medición que permitan simular en laboratorio los procesos de control de flujo y nivel de líquidos aplicado a diferentes cursos, brindando a los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén un entorno experimental que fortalezca la comprensión de los principios de control de procesos y su aplicación en contextos industriales. Para que esto pueda lograr, se recopilan datos de variables físicas, donde se puede ver distintos circuitos de control, además se realiza el análisis lógico y analítico de todas las señales encontradas.

2.2. Ubicación del área de estudio

Esta tesis se ejecutó en los ambientes de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ) Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en el Instituto de Investigación en Energías Renovables (INRER). La universidad es una institución pública de educación superior universitaria ubicada en Carretera Jaén – San Ignacio Km 24, Sector Yanuyacu. Ubicación geográfica -5.70833°S ; $-78.80694^{\circ}\text{W}$

Figura 1
Mapa de ubicación geográfica de ejecución de la tesis



2.3. Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández & Mendoza (2020), la investigación posee un enfoque experimental-aplicado, dado que se fundamenta en la manipulación deliberada de variables de control para observar su efecto en un sistema físico. Al ser un desarrollo de ingeniería, se orienta a la creación de una solución tecnológica específica, validando su desempeño mediante la recolección y análisis de datos en un entorno controlado de laboratorio.

Este tipo de investigación permite validar los fundamentos teóricos mediante ensayos prácticos y mediciones reales que tanto hacen falta para los estudiantes, en condiciones controladas dentro de un entorno de laboratorio o de experimentación didáctica llena de aprendizaje.

El uso de estos enfoques de métodos mixtos en la investigación permitió abordar íntegramente los diferentes aspectos del diseño, implementación y evaluación del prototipo didáctico de control de flujo y nivel de caudal, asegurando resultados de calidad y confiables.

Profundidad y Generalización: El uso de métodos cualitativos en la fase inicial permitió obtener una comprensión profunda del contexto y los modelos teóricos. La fase cuantitativa permitió generalizar los hallazgos y evaluar el rendimiento del prototipo de manera objetiva.

2.4. Diseño metodológico

La implementación del prototipo se consolida como una estrategia pedagógica transversal en la carrera de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (IME). El módulo permite a los estudiantes articular conocimientos de Dibujo Mecánico (CAD) para el diseño estructural, Mecánica de Fluidos para el análisis de caudales y Electrónica analógica y digital para la gestión de señales. Asimismo, actúa como plataforma para el curso de Programación de ingeniería y de Automatización industrial

2.4.1. Enfoque y Tipo de Investigación

La investigación se rige bajo un enfoque cuantitativo de carácter demostrativo, fundamentado en el registro, medición y análisis numérico de las variables hidráulicas del sistema. Los datos se obtienen mediante el uso de sensores electrónicos y equipos de adquisición de datos, permitiendo una interpretación objetiva del comportamiento del fluido. Asimismo, se emplea un diseño de tipo cuasi-experimental, orientado a comprobar empíricamente los principios de la hidráulica y validar la efectividad del control automático en la estabilización del proceso. La investigación se define como cuasi-experimental según Hernández & Mendoza (2020), debido a que, si bien existe una manipulación deliberada de la variable independiente para observar su efecto en la variable dependiente, no se realiza una asignación aleatoria de las

unidades de prueba. El estudio se centra en un grupo único y preestablecido (el prototipo didáctico), donde la validación se realiza mediante el contraste entre los datos experimentales obtenidos y el modelo matemático de referencia.

2.4.2. Descripción Técnica del Prototipo Experimental

Para la ejecución de las pruebas, se ha diseñado e implementado un sistema hidráulico integrado por componentes industriales y electrónicos. El prototipo se estructura a partir de un tanque inferior, que cumple la función de depósito de alimentación, y una bomba centrífuga encargada de impulsar el fluido hacia la sección superior del módulo. La regulación y el direccionamiento del flujo se gestionan mediante válvulas de control (tipo globo y check), las cuales permiten manipular las condiciones de operación del sistema.

El almacenamiento y la medición de la variable principal se realizan en un tanque superior, el cual está instrumentado con una red de sensores de presión, temperatura, flujo y nivel. Estos dispositivos se encuentran vinculados a un sistema de control electrónico dedicado a la supervisión y ejecución de las acciones de control realimentado.

2.4.3. Dinámica y Validación del Sistema

El propósito central del diseño experimental es garantizar que el sistema mantenga un caudal y un nivel constante, operando bajo consignas preestablecidas (setpoints). La validación del prototipo se centra en su capacidad para mitigar el impacto de perturbaciones externas o cambios repentinos en la configuración de las válvulas, demostrando así la robustez del algoritmo de control. Mediante este montaje, se busca evidenciar la transición de los conceptos teóricos de la dinámica de fluidos hacia una aplicación física funcional, permitiendo el análisis de la respuesta transitoria y el error en estado estable en un entorno controlado.

2.5. Base teórica

A partir de la revisión bibliográfica, se identificó y analizó los modelos matemáticos que se utilizan comúnmente en el control de flujo y nivel de caudal. Se evaluó diferentes enfoques, incluyendo modelos lineales y no lineales, y se seleccionó aquellos que mejor se adapten a las características del sistema a controlar.

Se realizó una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre sistemas de control de flujo y nivel de caudal. Esto incluyó la consulta de artículos científicos, libros especializados y recursos en línea. La revisión se centró en identificar teorías, métodos y tecnologías aplicables al control de flujo y nivel, así como en recopilar casos de estudio y aplicaciones prácticas relevantes.

2.5.1. Fundamentos de Control de Flujo y Nivel de Líquidos

El estudio del flujo de líquidos en sistemas hidráulicos involucra principios de la mecánica de fluidos y de la teoría del control automático. En un circuito cerrado compuesto por bombas, válvulas, sensores y tanques, el fluido experimenta variaciones de presión, velocidad y energía que pueden analizarse mediante las leyes de la conservación de la masa y la energía. Los sistemas de control de flujo y nivel representan procesos fundamentales en la industria y constituyen un excelente caso de estudio para la enseñanza de ingeniería de control.

El objetivo de un sistema de control de flujo y nivel es mantener variables hidráulicas (como caudal o altura del líquido) dentro de valores deseados, compensando perturbaciones (por ejemplo, cambios de carga o pérdidas de presión)

Los fundamentos de teoría de control automático presentados en esta sección constituyen la base conceptual para el diseño e implementación del prototipo didáctico. El sistema desarrollado integra control retroalimentado ON/OFF para operación automática, control manual mediante PWM para experimentación, arquitectura de control supervisora con interfaz

HMI, máquina de estados finitos para gestionar modos de operación, y sistemas de protección multicapa para garantizar seguridad. Esta combinación permite a los estudiantes no solo observar el funcionamiento de un sistema de control real, sino también comprender las decisiones de diseño, limitaciones de cada estrategia, criterios de desempeño, y la importancia de las protecciones en aplicaciones industriales. La validación experimental mediante comparación de modelos teóricos (tiempos de llenado/descarga, relación PWM-caudal, criterios de desempeño). Esta sección establece las bases teóricas de la mecánica de fluidos y el control automático que sustentan el diseño del prototipo didáctico.

2.5.1.1. Importancia en el contexto educativo e industrial

Los sistemas de control de nivel y flujo son ideales para la enseñanza de la ingeniería de control debido a que tienen una:

- **Dinámica comprensible:** Su comportamiento puede modelarse con ecuaciones diferenciales de primer orden, accesibles para estudiantes.
- **Respuesta visual inmediata:** Los cambios en el nivel son directamente observables, facilitando la correlación entre teoría y práctica.
- **Analogía con otros sistemas:** La dinámica de un tanque es análoga a la de sistemas térmicos, eléctricos (capacitor) y de inventarios, permitiendo la transferencia de conocimientos.
- **Aplicación industrial extensa:** Desde el control de reactores químicos hasta la gestión de reservorios de agua, constituye una competencia técnica muy valiosa.

2.5.1.2. Variables del proceso

En un sistema típico de tanques, como el implementado en este prototipo, las variables fundamentales son:

- **Variable Controlada (PV):** Nivel del líquido en el tanque $h(t)$. Es la magnitud que se desea mantener en un valor deseado (*Setpoint*).
- **Variable Manipulada (MV):** Caudal de entrada $Q_{in}(t)$ [m^3/s]. Es la acción sobre la cual el controlador actúa para influir en el nivel, típicamente a través del control de una bomba o una válvula.
- **Variable de Perturbación (DV):** Caudal de salida $Q_{out}(t)$. Representa una salida no controlada (como un consumo o un drenaje) que afecta al nivel y que el sistema debe rechazar.
- **Setpoint (SP):** Valor deseado para el nivel h_{sp} .

2.5.1.3. Principios de la mecánica de fluidos aplicados

El comportamiento del sistema se rige por dos principios fundamentales:

Conservación de la Masa (Ecuación de Continuidad)

La tasa de acumulación de masa en el tanque es igual al flujo másico que entra menos el que sale. Felder & Rousseau (2005) presentan la ecuación general de conservación de masa aplicada a sistemas dinámicos.

$$A \frac{dh(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (1)$$

Donde:

- A es el área transversal constante del tanque. Esta ecuación es el corazón del modelado dinámico del sistema.

2.5.1.4. Estrategias de control aplicables

Para un sistema didáctico como el propuesto, las estrategias más relevantes son:

Control ON/OFF (Bang-Bang):

Principio: El actuador (bomba) solo tiene dos estados:

ENCENDIDO ($Q_{in} = Q_{max}$) o APAGADO ($Q_{in} = 0$).

Implementación: Se activa cuando $h < h_{sp} - \Delta$ y se desactiva cuando $h > h_{sp} + \Delta$, donde Δ es una banda de histéresis para evitar ciclado excesivo.

Ventaja: Simpleza, bajo costo y fácil comprensión. Es ideal para una primera aproximación didáctica.

Desventaja: Produce oscilaciones continuas alrededor del setpoint y desgaste en los actuadores.

Control Proporcional (P) y Proporcional-Integral (PI):

Principio: La acción de control es continua y proporcional al error $e(t) = h_{sp} - h(t)$.

El control PI añade una acción integral para eliminar el error en estado estacionario.

Ecuación básica (P) según Dorf & Bishop (2022):

$$Q_{in}(t) = Q_{bias} + K_p \cdot e(t) \quad (2)$$

Donde: K_p es la ganancia proporcional.

Aplicación: Permite un control más suave y preciso que el ON/OFF, y es el algoritmo más usado en la industria. Su implementación en el prototipo

2.5.2. Fundamentos de control automático

Un sistema de control automático es un conjunto interconectado de componentes que actúa para mantener el desempeño de un sistema dentro de límites deseados sin intervención

humana continua salvo algunas excepciones. Según Nise (2020), los sistemas de control son fundamentales en la industria moderna, permitiendo mayor precisión, consistencia y eficiencia en procesos que van desde manufactura hasta sistemas de energía renovable.

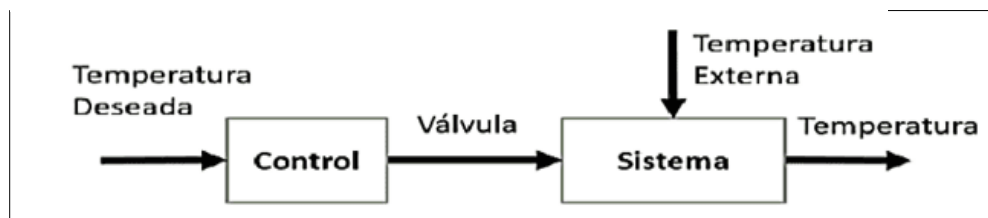
Para Dorf & Bishop (2022) dicen que un sistema de control es un sistema que proporciona una respuesta deseada mediante el control de la salida del proceso. La meta es hacer que la variable controlada alcance y mantenga un valor deseado (Set point) a pesar de perturbaciones externas y cambios en los parámetros del sistema.

Los sistemas de control pueden ser de dos tipos:

2.5.2.1. Control en Lazo Abierto

En un sistema de lazo abierto, la salida no tiene efecto sobre la acción de control. La señal de control se calcula únicamente en función de la referencia, no considerando el comportamiento real del sistema.

Figura 2
Lazo abierto de control



Características (Stanley, M. 1998):

- No usa retroalimentación de la variable controlada
- Más simple y económico
- Menos preciso, sensible a perturbaciones
- Depende críticamente de la calibración inicial
- Adecuado cuando las perturbaciones son mínimas y predecible

Ecuación general:

$$u(t)=f(r(t)) \quad (3)$$

Donde:

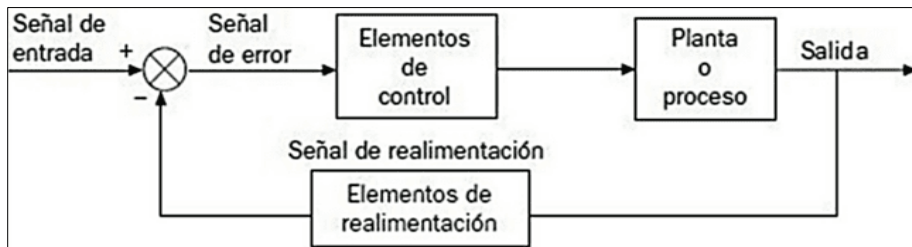
- $u(t)$ = señal de control
- $r(t)$ = señal de referencia
- No hay dependencia de la salida $y(t)$

2.5.2.2. Control en Lazo Cerrado (Retroalimentado)

El control en lazo cerrado utiliza la medición de la variable de salida para generar una señal de error que ajusta continuamente la acción de control.

Figura 3

Lazo cerrado de control



La retroalimentación es el principio fundamental que permite a sistemas de control compensar incertidumbres, perturbaciones y variaciones de parámetros a medir.

Características (Dorf & Bishop, 2022):

- Usa retroalimentación de la variable controlada
- Corrige automáticamente desviaciones del set point
- Menos sensible a perturbaciones y variaciones de parámetros
- Puede presentar problemas de estabilidad si no se diseña correctamente
- Requiere sensores de medición

Ecuación general:

$$e(t)=r(t)-y(t) \quad (4)$$

$$u(t)=C[e(t)] \quad (5)$$

Donde:

- $e(t)$ = error o señal de retroalimentación

- $r(t)$ = set point o referencia
- $y(t)$ = variable controlada (medida)
- $C[\cdot]$ = ley de control

Ventajas de la retroalimentación (Franklin et al., 2020):

- Reduce sensibilidad a perturbaciones externas
- Compensa incertidumbres en el modelo del proceso
- Mejora la precisión del seguimiento de referencia
- Permite estabilizar procesos inestables en lazo abierto
- Reduce efectos de variaciones de componentes

Para este módulo se usó el control de velocidad de una bomba mediante PWM fijo por un tiempo determinado y se pueda cambiar la velocidad cuantas veces se desee mediante una instrucción.

2.5.3. Variables y Componentes de un Sistema de Control

Según Nise N. (2020), todo sistema de control retroalimentado consta de los siguientes elementos principales:

- **Set Point (SP) o Referencia:** Valor deseado que debe alcanzar la variable controlada. Puede ser constante (control regulatorio) o variable en el tiempo (control servo). El set point define el objetivo de desempeño del sistema.
- **Variable de Proceso (PV) o Variable Controlada:** Es la cantidad física que se desea mantener en el valor del set point. Esta variable debe ser medible en tiempo real y responder a los cambios en la variable manipulada. En este caso se mide el

nivel de los tanques en función del caudal de entrada (controlado por PWM) y el tiempo transcurrido.

- **Error (e):** Diferencia entre el set point y el valor medido de la variable de proceso:

$$e(t) = SP - PV(t) \quad (6)$$

El error es la señal más importante que impulsa la acción de control, minimizar el error en estado estacionario y durante transitorios es el objetivo principal del diseño de controladores.

- **Controlador:** Elemento que toma decisiones basadas en el error y genera la señal de control. Según Ramírez (2025), el controlador implementa un algoritmo matemático (PID, ON/OFF, fuzzy, etc.) que determina cómo debe ajustarse el actuador para reducir el error.

En este caso se usa el control ON/OFF o de dos posiciones (control bang-bang), es la estrategia de control más simple pero ampliamente utilizada en aplicaciones industriales y domésticas. Según Seborg et al. (2023), aproximadamente el 90% de los controladores industriales utilizan algoritmos ON/OFF o PID, siendo el ON/OFF preferido en aplicaciones por su simplicidad y bajo costo.

- **Variable Manipulada (VM):** Cantidad que el controlador ajusta para influir en la variable controlada. Según Escaño & Maestre (2018), debe existir una relación causal fuerte entre la variable manipulada y la variable controlada para que el control sea efectivo.
- **Actuador:** Dispositivo físico que ejecuta la acción de control modificando el proceso. Para Franklin et al., (2020) estos ejemplos incluyen válvulas de control, bombas de velocidad variable, resistencias eléctricas, motores.
- **Proceso o Planta:** Sistema físico que se desea controlar. Según Choto & Guanotasig (2024), el proceso transforma la variable manipulada en la variable controlada

mediante su dinámica característica (función de transferencia, ecuaciones diferenciales).

- **Sensor o Transductor:** Dispositivo que mide la variable controlada y la convierte en una señal eléctrica procesable por el controlador; las características del sensor (precisión, tiempo de respuesta, ruido) afectan significativamente el desempeño del sistema de control.

- **Perturbaciones:** Señales no deseadas que afectan la variable controlada. Según Nise (2020), las perturbaciones pueden ser:

Medibles: Pueden detectarse y usarse para control anticipativo (feedforward)

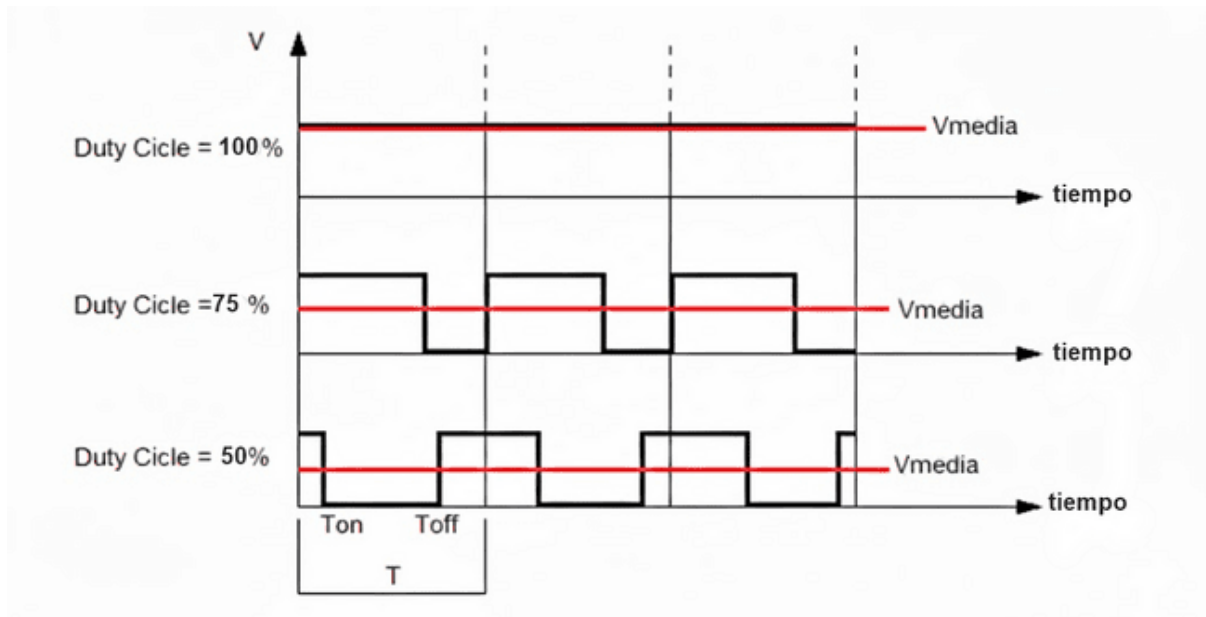
No medibles: Solo pueden rechazarse mediante retroalimentación.

El PWM (Pulse Width Modulation)

La Modulación por Ancho de Pulso (PWM) se basa en la creación de una señal con amplitud constante, pero con un ancho de pulso que varía entre el 0% y el 100% del período total de la señal. Esta variación en el ancho del pulso se conoce como Ciclo de Trabajo (Duty Cycle - DC). El DC es la relación entre el tiempo que la señal permanece en nivel lógico alto (encendida) y el período total de la señal. El Ciclo de Trabajo está directamente relacionado con la tensión promedio que se entrega a la carga

La velocidad de un motor CC se regula directamente modificando la tensión de alimentación que se aplica a sus bobinas: a mayor tensión, mayor velocidad de giro. Un método sencillo y eficiente para lograr este control es la Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Esta técnica es preferible a otros métodos de control de tensión porque mantiene constante el par motor y la señal generada es menos susceptible al ruido y más económica para la implementación de PWM con ARDUINO, aunque una placa ARDUINO solo tiene salidas digitales, puede generar una señal PWM usando la función analogWrite.

Figura 4
Representación de la señal PWM



Nota: Adaptado de Silva, 2014

Esta señal ajusta el ciclo de trabajo según un valor de entrada, que puede ser predefinido o recibido por comunicación serial. En el caso específico del ARDUINO UNO, la señal PWM se representa con valores en el rango de 0 a 255, correspondientes a tensiones de 0 a 5 V. Esta señal PWM se envía a un circuito integrado, el cual se encarga de aplicar una tensión proporcional al motor de la bomba sumergible, controlando así su velocidad. Por ejemplo, podemos tomar cualquier valor que esta entre 0 y 255 se puede variar, en este caso dependiendo del límite mínimo de impulsión de la bomba.

Definición y Principio de Operación

Se define el control ON/OFF como un controlador de retroalimentación no lineal en el cual el actuador solo puede adoptar dos estados discretos: completamente activado (ON) o completamente desactivado (OFF). La decisión se toma comparando el error con un umbral de conmutación.

Para nuestro sistema se usa el estado ON (Bomba activada, llenando); el estado OFF (Bomba desactivada, no llenando o apagada), se considera el criterio: Si nivel < set point es

ON; si nivel \geq set point es OFF. Además, en ese mismo instante si nivel \geq set point es ON válvula solenoide de lo contrario está en OFF (cerrada).

2.5.4. Modelamiento matemático

El modelado matemático del sistema de tanques es fundamental para predecir su comportamiento dinámico, diseñar estrategias de control y validar experimentalmente el prototipo.

Se vio la geometría del tanque, teniendo en cuenta que el tanque es prismático

- Largo: a [m]
- Ancho: b [m]
- Altura máxima: c [m]

Área de la base del tanque es : $A = a \cdot b$

Relación entre volumen y altura del agua:

$$Q = A \cdot v \quad (7)$$

a. Modelamiento matemático para la carga

Se tiene un módulo con un caudal de ingreso constante, no hay salida de agua mientras se está llenando el agua, sabiendo que el agua es incompresible, además la sección transversal del tanque es constante.

Balance de volumen:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} \quad (8)$$

Sustituyendo: $V = A \cdot h$:

$$A \frac{dh}{dt} = Q_{in} \quad (9)$$

Se obtiene la ecuación diferencial del Modelo matemático:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} \quad (10)$$

Para encontrar la altura en función del tiempo, se toma en consideración lo siguiente:

Si la altura inicial es $h(0) = h_0$, entonces

$$h(t) = h_0 + \frac{Q_{in}}{A} t \quad (11)$$

Se tiene una restricción física

$$0 \leq h(t) \leq c$$

Se hace el modelamiento bajo la condición, que la altura a llenar ($h(t)$), no sea mayor que mi altura máxima del tanque.

a. Modelamiento matemático para la descarga

Se tiene el módulo con un caudal de salida constante, no hay ingreso de agua mientras se está vaciando, sabiendo que el agua es incompresible, además la sección transversal del tanque es constante. Asumiendo una la velocidad media de agua en la tubería, el caudal queda expresado de la siguiente manera.

$$Q_{out} = C_d A_0 \sqrt{2gh} \quad (12)$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga, haciendo el balance de volumen

$$\frac{dV}{dt} = -Q_{out} \quad (13)$$

Sustituyendo $V = A \cdot h$ (A es el área de la base del tanque y h es la altura del tanque)

$$A \frac{dh}{dt} = -Q_{out} \quad (14)$$

Ecuación diferencial del modelo matemático:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_{out}}{A} \quad (15)$$

Para encontrar la altura en función del tiempo, sabiendo que la altura va disminuyendo conforme avanza el tiempo, se toma en consideración lo siguiente:

Si la altura inicial es $h(0) = h_0$

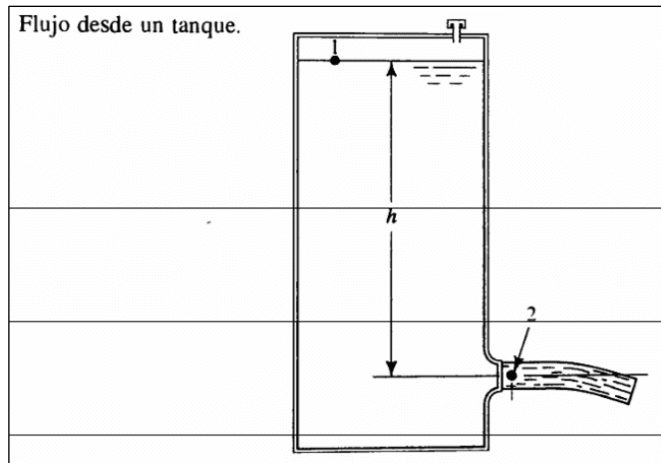
$$h(t) = h_0 - \frac{C_d A_0 \sqrt{2gh}}{A} t \quad (16)$$

Se tiene una restricción física

$$0 \leq h(t) \leq c$$

Figura 5

Esquematización del vaciado



Nota: Tomado de (Mott, 2006)

En el prototipo desarrollado, la ecuación de continuidad se aplicó para validar las mediciones del caudalímetro YF-S201, verificando que el caudal medido en la tubería de ½" coincide con el balance de masa entre tanques.

2.5.5. Componentes y Arquitectura del Sistemas Didáctico

Para Arevalo & chango (2024), un prototipo didáctico efectivo integra subsistemas fundamentales:

Subsistema hidráulico: El sistema hidráulico comprende dos tanques cuadrados de agua, tuberías de PVC, válvulas (check y de globo), accesorios (codos y T)

Subsistema de instrumentación: Incluye sensores (de caudal, ultrasónico y de presión), y transmisores que convierten las variables físicas en señales eléctricas. Como el caso del controlador RS485 que se encarga de la comunicación entre el sistema con la interfaz gráfica.

Subsistema de control: Abarca controladores (Arduino uno R3, Arduino Pro Mini, tarjetas) que implementan los algoritmos de control para mantener las variables del proceso en los valores deseados.

Una vez desarrollado el modelo matemático, se procedió a su implementación en el software de simulación seleccionado. Esto implicó la codificación del modelo, la configuración de las condiciones iniciales y de las variables de entrada, así como la preparación del entorno de simulación para ejecutar los experimentos necesarios. Este modelo incorporó las ecuaciones diferenciales y los parámetros necesarios para representar con precisión la dinámica del sistema. Se tuvieron en cuenta las características físicas del prototipo didáctico y las variables de control pertinentes.

2.6. Materiales

Se usaron los siguientes materiales:

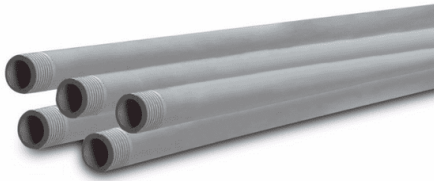
2.6.1. Elementos Hidráulicos

- **Tubo de PVC**

Se emplearon tuberías de PVC debido a su resistencia mecánica, baja reactividad y adecuada capacidad para conducir caudales típicos en sistemas de pequeña escala. El diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada facilita la observación de variaciones de flujo y nivel, permitiendo que los estudiantes analicen en tiempo real cómo afectan estos cambios al comportamiento del sistema.

Figura 6

Tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada



Nota: Recuperada de <https://tubospvc.com.pe/producto/tubo-pvc-1-2-ur/>

- **Codos de PVC**

Los codos complementan la estructura de conducción, posibilitando modificar la dirección del flujo sin generar turbulencias excesivas. Su inclusión permite recrear configuraciones comunes en instalaciones hidráulicas y analizar la influencia de estos accesorios en las pérdidas de carga.

Figura 7

Codos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada



Nota: Recuperado de <https://tuberiaspvc.pe/producto/codo-pvc-1-2-x-90-sp/>

- **Válvula de paso**

La válvula de paso se utiliza como elemento principal de regulación manual del caudal. Su función es permitir al usuario abrir, cerrar o dosificar el flujo hacia el tanque superior, ofreciendo un control directo que sirve como referencia para comparar el comportamiento manual frente al automatizado del prototipo.

Figura 8
Válvula de globo



Nota: Recuperado de <https://empresas.efc.com.pe>

- **Válvula check**

Este dispositivo cumple la función de evitar el retroceso del agua hacia el tanque o la línea de alimentación. Su presencia es fundamental para garantizar la estabilidad del sistema y prevenir condiciones no deseadas durante las pruebas, especialmente cuando se evalúan fallas controladas o escenarios de sobrepresión.

Figura 9
Válvula check



Nota: Recuperado de <https://ferrehuanca.limafac.pe/shop/check-cim-valve-paso/>

- **Tanque inferior (depósito de almacenamiento)**

El tanque inferior actúa como reserva principal de agua. Está diseñado para proporcionar un suministro continuo al sistema y simular condiciones de operación estables. Su capacidad permite repetir ciclos de llenado y vaciado sin interrupciones, asegurando consistencia en los ensayos realizados por los estudiantes.

- **Tanque superior (tanque elevado)**

El tanque superior constituye el punto de referencia para el control de nivel. Su elevación permite reproducir diferencias de presión típicas en sistemas gravitacionales, y su diseño transparente o de fácil visualización facilita el seguimiento del comportamiento dinámico del nivel durante las pruebas. Es un componente esencial para validar las mediciones del prototipo y su respuesta frente a distintos escenarios operativos.

Figura 10

Tanque inferior y superior puesto en la estructura



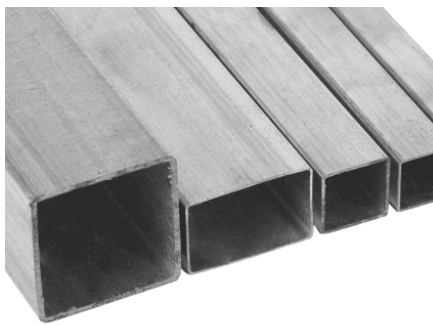
2.6.2. Equipos y actuadores

- **Estructura principal**

Fabricado con tubo de hierro rectangular galvanizado de 40mm x 60mm x 2mm x 6m en sus lados y las partes complementarias con tubo cuadrado de 40 mm x 40mm x 2mm x 6m en la base se ha soldado cuatro garruchas de 8 mm de alto. Esto nos da una altura del suelo hacia la parte más alta de la estructura de 1.81 m.

Figura 11

Tubo metálico galvanizado



- **Bomba de agua ($Q = 800 \text{ L/h}$, $h_{\text{max}} = 5 \text{ m}$)**

1 Bomba de agua de 1/2" 12VDC 5m 800L/h de tipo centrífuga y con conexión roscada de 1/2" de diámetro que permite expandir los límites de tus proyectos y experimentar con sistemas de fluidos. La bomba es de tamaño reducido, de bajo consumo eléctrico, silenciosa, diseñada para trabajar en modo continuo, su motor interno es de tipo sin escobillas (brushless) lo que asegura una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento. La potencia de 19W permite un flujo de agua de hasta 800 litros por hora. Se utiliza una bomba de caudal medio con una capacidad de 800 L/h y una altura máxima de elevación de 5 metros. Estas características permiten reproducir condiciones realistas de impulsión de agua, asegurando un suministro constante hacia el tanque superior. Su rendimiento estable facilita evaluar la influencia del caudal sobre el control del nivel y comparar los valores reales con los cálculos teóricos.

Figura 12
Bomba de agua



Fuente: <https://naylorlampmechatronics.com/>

Tabla 1
Especificaciones técnicas de la bomba de agua

Características	Valores
Voltaje de operación	5-12V DC
Corriente de máxima	350mA
Potencia	19W
Caudal máximo	800L/h (13L/min)
Columna de agua máximo	5m
Conexión rosca	1/2
Carcasa de plástico	negro
Líquidos de trabajo	Agua, aceite, gasolina
dimensiones	80*80*65 mm aprox
Peso	220 gramos
Tipo de válvula	Diafragma
Dimensiones	85*60*26 mm

Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylorlampmechatronics.com/>

- **Driver mosfet**

El driver MOSFET actúa como intermediario entre los microcontroladores y los elementos de potencia, permitiendo gobernar la bomba y otros actuadores sin comprometer los circuitos de control. Su integración asegura una conmutación eficiente y reduce pérdidas energéticas, lo que aporta precisión en las pruebas de automatización. Utilizándose para activar o desactivar la válvula solenoide de 5V de baja presión, asimismo se utilizó para adaptar el voltaje necesario de 5V, mientras que nuestra placa de desarrollo Arduino trabaja a 3.3V.

Figura 13
Driver mosfet dual AOD4184A

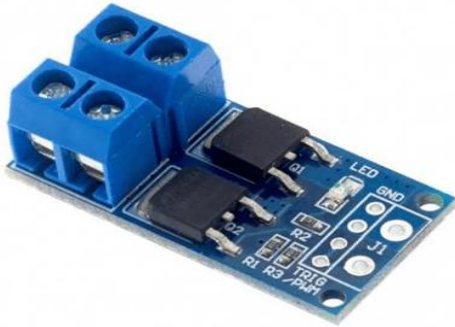


Tabla 2
Especificaciones técnicas del driver mosfet

Características	Valores
Modelo	AOD4184A
Voltaje de operación	5V - 36V DC
Consumo de corriente	15mA (5V)
Capacidad de carga	10mA (5 VDC)
Salida	Onda cuadrada pulsante
Rango de Flujo	1-30L/min
Volumen promedio por pulso	2.25mL
Pulso por litro	450
Factor de conversión	7.5
Rosca externa	1/2" NPS
Presión de trabajo máx.	1.75MPa (17 bar)
Temperatura de funcionamiento	25°C a 80°C
Material	Plástico color negro

Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylampmechatronics.com/>

- **Válvula solenoide 1/2" 12VDC (NC)**

Las válvulas solenoides son un tipo de electroválvula todo/nada o abierto/cerrado. Tienen dos partes: el solenoide y el cuerpo de plástico. El solenoide es un electroimán que al ser energizado se desplaza junto con el diafragma de la válvula y permite el paso del fluido. La válvula se mantiene abierta mientras el solenoide está energizado. Cuando no está alimentado un resorte se encarga de regresar la válvula a su posición de reposo, que en este caso es del tipo normalmente cerrada (NC). (Naylamp Mechatronics s/f)

Usada para regular el flujo de agua en una tubería de pequeña dimensión, puede ser usada en baja y en alta presión, para este caso se usó la de baja presión. Esta permite el paso de agua cuando el tanque superior alcance el punto máximo indicado en el Setpoint o cuando se tenga descargar de emergencia usando los comandos de vaciado del tanque. La válvula solenoide normalmente cerrada opera como un actuador automático que habilita o restringe el paso de agua según las señales enviadas por el controlador. Su diseño de 1/2 pulgada se adapta al circuito hidráulico del prototipo, y su respuesta rápida permite evaluar estrategias de control en eventos.

Figura 14
Válvula solenoide NC baja presión



Nota: Recuperado de <https://naylampmechatronics.com/>

Figura 15
Especificaciones técnicas de la válvula solenoide

Características	Valores
Voltaje de operación	12V DC
Corriente de operación	0.6A
Potencia consumo	8W
Temperatura de funcionamiento	5°C a 60°C
Presión de funcionamiento mínima	0 MPa (0 Bar = 0 mca)
Presión de funcionamiento máximo	0.01 MPa (0.1 Bar = 1.02 mca)
Tiempo de respuesta (apertura):	≤ 0.15 s
Tiempo de respuesta (cerrado):	≤ 0.3 s
Conector tubería	Rosca externa 1/2" NPS Macho
Material	Plástico ABS
Tipo de válvula	Diafragma
Dimensiones	85*60*26 mm

Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylampmechatronics.com/>

5

2.6.3. Sensores e instrumentación

- **Sensor de flujo de agua YF-S201 o caudalímetro**

Este dispositivo se usó para medir el caudal de agua que ingresa al tanque superior, un segundo caudalímetro para notar el caudal del flujo de agua al momento de la descarga tomando en cuenta que es por gravedad. Sabiendo que caudal se refiere a la cantidad de flujo volumétrico de líquido que pasa por la tubería en el intervalo de tiempo configurado para realizar la medición. Este caudalímetro ofrece mediciones en tiempo real del volumen de agua que circula por el sistema. Su principio de funcionamiento, basado en una turbina interna, permite obtener pulsos proporcionales al caudal, lo que facilita contrastar las mediciones empíricas con los valores teóricos y afinar los parámetros del prototipo.

Figura 16

Sensor de flujo de agua de 1/2 " YF-S201



Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylampmechatronics.com/>

Tabla 3

Especificaciones técnicas del caudalímetro

Características	Valores
Modelo	YF-S201
Voltaje de control	3.3V-20V DC
Voltaje de potencia	5V-36V DC
Corriente de salida continua(carga)	15A máx.
Soporta picos de corriente	hasta 30A (máx.10 segundos)
Frecuencia PWM	0-20kHz
Temperatura de trabajo	40°C a +85°C
Dimensiones	34*17*12 mm (LxWxH)

- **Sensor ultrasónico JSN-SR04T**

Es un sensor de distancia que utiliza ultrasonido (sonar) para determinar la distancia de un objeto en un rango de 25 a 450 cm. Destaca especialmente por su resistencia al agua, pequeño tamaño, bajo consumo energético y buena precisión. Perfecto para aplicaciones donde el sensor estará expuesto a la intemperie/humedad/agua, trabaja con ultrasonido y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición. El sensor ultrasónico resistente al agua se emplea para la medición del nivel en el tanque superior. Su capacidad de operar en ambientes húmedos y su precisión en distancias cortas lo convierten en una herramienta ideal para registrar variaciones dinámicas del nivel sin contacto directo con el líquido.

Figura 17

Sensor ultrasónico JSN-SR04T



Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylampmechatronics.com/>

Tabla 4

Especificaciones técnicas del sensor de ultrasónico

Características	Especificaciones
Dispositivo Base	JSN SR04T
Modelo	AJ-SR04M
Voltaje de Operación	5 VDC
Corriente de Trabajo	30 mA
Rango de Detección	25 a 450 cm
Temperatura de Trabajo	-10 °C hasta 70 °C
Zona Muerta	< 20 cm
Precisión	3 mm
Frecuencia de Emisión Acústica	40 KHz
Duración mín. de pulso de disparo (nivel TTL)	10 µS
Tiempo mínimo de espera entre mediciones	20 ms
Ángulo de Detección	Menor a 50°
Característica especial	A prueba de agua (parte delantera)
Longitud del cable	2.5 m
Dimensiones	40 mm x 28 mm x 50 mm
Peso	50 g

- **Sensor de presión HK 3022**

Los sensores de presión o transductores de presión son muy habituales en muchos procesos industriales. Su objetivo es transformar una magnitud física en una eléctrica, en este caso transforman una fuerza por unidad de superficie (presión) en un voltaje proporcional a la presión ejercida. Este sensor se incorpora para registrar la presión interna del sistema hidráulico, permitiendo analizar la relación entre presión, caudal y altura de columna de agua. Su sensibilidad aporta datos esenciales para validar el comportamiento teórico del prototipo.

Figura 18

Sensor de presión



Nota: Tomados de la ficha técnica según <https://naylorlampmechatronics.com/>

Tabla 5

Especificaciones técnicas Sensor de presión

Características	Valores
Voltaje	0.5-4.5VDC
Corriente	10mA
Rango de presión de trabajo	0- 0.5 MPa (0-5Bar o 0-72.5psi)
Presión máxima	1.5 MPa
Tiempo de respuesta	≤ 2.0 ms
Temperatura de trabajo	0-85°C
Fluido de trabajo	Gas, Aire comprimido, Agua, Aceite.
Dimensiones	26*26*60 mm
Conexiones: Rojo	(5V), Negro(tierra), Amarillo (Salida)

- **Sensor de temperatura DHT22**

Es un sensor digital diseñado para medir temperatura y humedad relativa con buen rendimiento y bajo costo. Utiliza un sensor capacitivo para la humedad y un termistor para la temperatura, ofreciendo mediciones precisas del aire circundante. Su salida es completamente digital, transmitiendo los datos mediante un único pin de datos, sin necesidad de señales analógicas. El sensor de temperatura complementa la instrumentación al permitir monitorear posibles variaciones térmicas que puedan influir en la densidad del agua o en el rendimiento de los equipos. Se usa para corregir la densidad del agua en los cálculos teóricos de Bernoulli, además se usa para monitorear la densidad del agua en diferentes cambios de temperatura, y cuanto esto afecta al caudal de ingreso o al de salida.

Figura 19
Sensor de temperatura

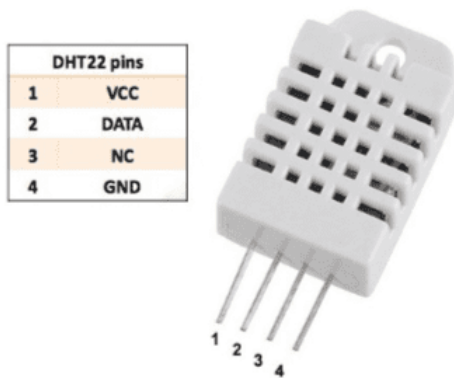


Tabla 6
Especificaciones técnicas de DHT22

Características	Valores
Modelo	DHT 22
Voltaje de Operación	3V-6V DC
Rango de medición de temperatura	-40°C a 80 °C
Precisión de medición de temperatura	<±0.5 °C
Rango de medición de humedad	De 0 a 100% RH
Interface digital	Single-bus (bidireccional)
Tiempo de censado	2s
Dimensiones	20*15*8 mm

2.6.4. Controladores electrónicos

- **Arduino uno**

Es una tarjeta de desarrollo que tiene como núcleo al microcontrolador ATmega328P(Atmel/Microchip) y el chip conversor USB Serial ATmega16U2 microcontrolador usado como la unidad central de procesamiento del sistema del control implementado, cuenta con 14 entradas/salidas digitales (6 pueden usarse como PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz y UART para la comunicación serial. Además, posee conexión USB, conector de alimentación, conector ICSP y un botón de Reset.

En este sistema, a él están conectados todos los sensores, este recibe las señales, ejecuta los algoritmos de control automático y activa los actuadores según corresponda. Además, cumple el rol de controlador principal. Su uso ampliamente difundido en entornos académicos facilita la comprensión de los procesos de lectura, procesamiento y actuación. Desde esta placa se ejecutan los algoritmos de control y se gestionan las señales de los sensores y actuadores.

Figura 20
Placa de desarrollo Arduino UNO



Tabla 7
Especificaciones técnicas de Arduino UNO

Características	Valores
Microcontrolador	ATmega328P (8-bit)
Chip USB	ATmega16U2
Conector USB	USB-B hembra
Voltaje de operación	5V DC
Voltaje de alimentación	6V - 20V DC(7-12V)
Pines digitales I/O	14 (6 salidas PWM)
Entradas analógicas	6 (ADC 10-bit)
Corriente entrada/salida por pin	40mA más
Memoria FLASH	32KB (2KB usados por Bootloader)
Memoria SRAM	2KB
Memoria EEPROM	1KB
Frecuencia de reloj	16 MHz
Leds indicadores	Power, L (Pin 13), TX y RX
Dimensiones	73*53*13 mm
Peso	30 gramos

- **Arduino Pro Mini**

El Arduino Pro Mini es un controlador auxiliar utilizado para tareas específicas como la adquisición de datos local, funciones autónomas, o gestión independiente de sensores distribuidos. Está diseñada para trabajar en protoboard o proyectos wearables (uso en ropa) donde el factor espacio es prioritario. Posee el microcontrolador ATmega328P, el mismo microcontrolador del Arduino Uno y Nano. El Arduino Pro Mini fue diseñado por *Spark Fun Electronics* (USA) con la idea de hacer la placa Arduino más pequeña y económica posible. (Naylamp Mechatronics s/f).

Se usó esta pequeña placa por el espacio reducido, pero sin restarle eficiencia al producto final, a diferencia de la placa anterior esta necesita una interfaz de programación. Necesita una interface USB-Serial TTL para ser programado. El Arduino Pro Mini funciona como una unidad auxiliar, ideal para realizar tareas de medición o comunicación distribuida sin sobrecargar

el controlador central. Su bajo consumo y tamaño compacto permiten ampliar el modularidad del prototipo.

Figura 21
Arduino pro mini

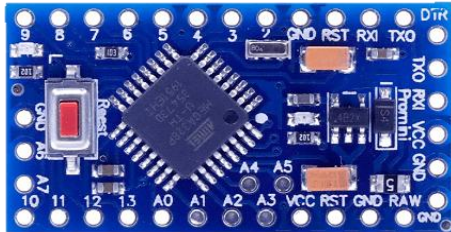


Tabla 8
Especificaciones técnicas del Arduino Pro Mini

Características	Valores
Modelo	Pro Mini 328 - 3.3V/8MHz
Microcontrolador:	ATmega328P (8-bit)
Voltaje de operación	3.3V DC (VCC)
Voltaje de Alimentación	3.3V - 9V DC (Pin RAW)
Pines digitales I/O	14 (6 PWM)
Entradas analógicas	8 (ADC 10-bit)
Corriente DC por Pin I/O	40 mA (Max.)
Memoria FLASH	2KB (2KB usados por el Bootloader)
Memoria SRAM	2KB

2.6.5. Interfaces de comunicación

- **Módulo Conversor RS485 a serial TTL**

Interfaz de comunicación industrial que permite el intercambio confiable de datos entre el Arduino y los sensores o actuadores que operan bajo el protocolo Modbus RTU. Es responsable de la transmisión diferencial resistente al ruido, característica esencial en entornos eléctricos con bombas o motores. Este módulo habilita la comunicación robusta entre dispositivos en distancias mayores o en entornos con ruido eléctrico. Su inclusión permite explorar configuraciones industriales de comunicación, fortaleciendo el carácter didáctico del sistema.

Figura 23
Convertor de nivel 5A XL4005

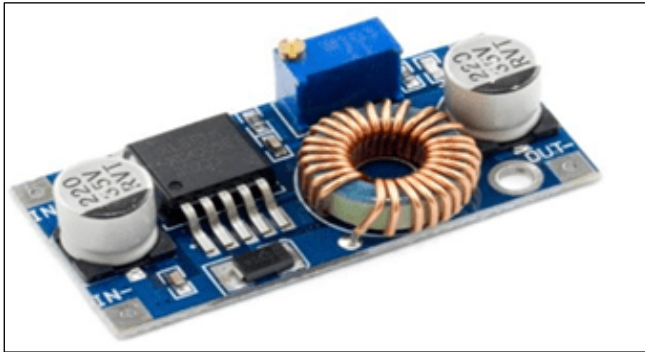


Tabla 10
Especificaciones técnicas del convertor XL405

Características	Valores
Voltaje de entrada	5.0V a 32V DC
Voltaje de salida	0.8V a 30V DC
Voltaje de salida ajustable	V. entrada debe ser 1.5V mayor que la salida
Corriente de salida	5A máx., 4.5A recomendado
Potencia de salida	50W-70W
Eficiencia de conversión	96% máx.
Regulación de carga	$S(I) \leq 0.8\%$
Regulación de voltaje	$S(u) \leq 0.8\%$
Frecuencia de Trabajo	300KHz
Ripple en la salida	50mV (máx.) 20MHz bandwidth
Protección de sobre temperatura	SI (apaga la salida)
Protección de CC	SI (hasta 8A)
Dimensiones	43*21*13 mm

- **Display LCD TFT 2.4" SPI Táctil (HMI)**

Esta pantalla táctil a color constituye la interfaz humano-máquina (HMI) principal del prototipo. Permite la visualización en tiempo real de todas las variables del proceso (nivel, caudal, presión, temperatura) y el estado de los actuadores, además de facilitar la interacción del usuario para configurar setpoints, cambiar modos de operación (automático/manual) y ejecutar comandos como el inicio/parada del sistema o el vaciado del tanque. Su comunicación

mediante protocolo SPI con el microcontrolador Arduino Pro Mini asegura una actualización rápida de los gráficos y una respuesta táctil ágil, mejorando significativamente la experiencia didáctica y la usabilidad del prototipo.

Figura 24
Interfaz HMI

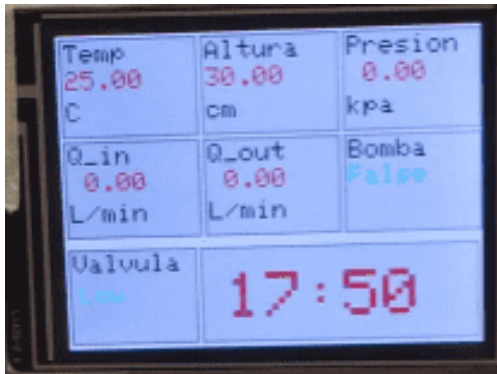


Tabla 11
Especificaciones técnicas de la pantalla HMI

Características	Valores
Voltaje de entrada	5.0V a 32V DC
Voltaje de salida	0.8V a 30V DC
Voltaje de salida ajustable	$EI \text{ Vin} > 1.5V > \text{Vout}$
Corriente de salida	5A máx, 4.5A recomendado
Potencia de salida	50W-70W
Eficiencia de conversión	96% máx.
Regulación de carga	$S(I) \leq 0.8\%$
Regulación de voltaje	$S(u) \leq 0.8\%$
Frecuencia de Trabajo	300KHz
Ripple en la salida	50mV (máx.) 20MHz bandwidth
Protección de sobre-temperatura	SI (apaga la salida)
Protección de corto circuito	SI (hasta 8A)
Protección limitadora de corriente	SI

3

2.6.6. Componentes eléctricos y complementarios

- **Fuente de alimentación de 12 V / 5 V**

Provee la energía necesaria para la bomba, controladores y sensores. Su correcta regulación garantiza la estabilidad del sistema de control. La fuente suministra las tensiones necesarias para los actuadores y los módulos electrónicos. Su estabilidad es fundamental para asegurar mediciones confiables y evitar fluctuaciones que puedan afectar el desempeño del prototipo.

Figura 25

Fuente de alimentación



- **Protoboard, cables Dupont y conectores**

Elementos auxiliares para el cableado y ensamble de los módulos electrónicos. La protoboard se utilizó como plataforma principal para el montaje temporal del sistema de control. Su estructura de conexiones internas facilita ensayar diferentes configuraciones de circuitos sin necesidad de soldadura, lo que permite ajustar rápidamente la disposición de sensores, actuadores y módulos electrónicos durante la fase de diseño. Este componente es esencial para validar las primeras interacciones entre el hardware y los algoritmos de control antes de consolidar el cableado definitivo. Los cables Dupont, tanto en sus versiones macho–macho, macho–hembra y hembra–hembra, permiten establecer conexiones flexibles y seguras entre los componentes del prototipo. Su uso garantiza una transmisión confiable de señales y alimentación, además de facilitar modificaciones durante la experimentación. Los conectores complementarios aseguran

una correcta integración de módulos sensibles como caudalímetros, sensores ultrasónicos y microcontroladores, reduciendo el riesgo de fallas por mala conducción.

Figura 26

Cables Dupont



- **Relé o módulo de potencia**

Permite controlar el encendido y apagado de la bomba desde el Arduino, aislando la electrónica de control de la carga eléctrica. El relé o módulo de potencia actúa como un elemento intermedio indispensable entre el microcontrolador y los dispositivos de mayor consumo eléctrico, como la bomba de agua o la válvula solenoide. Al aislar eléctricamente el circuito de control del circuito de potencia, protege los microcontroladores frente a sobrecargas y permite conmutar cargas con seguridad y precisión. Su incorporación facilita ejecutar estrategias de control a partir de señales de baja tensión, sin comprometer la estabilidad del sistema.

2.6.7. Estructura y Soporte Mecánico

- **Base metálica con acrílico**

Superficie de soporte para montar los tanques, la tubería y el sistema electrónico. La estructura principal del prototipo está conformada por una base metálica reforzada, seleccionada por su estabilidad, resistencia a la vibración y larga durabilidad. Sobre esta base se integra un panel de acrílico que actúa como superficie de montaje para los tanques, la red de tuberías y el sistema electrónico. El acrílico permite una visualización clara de los componentes, facilitando que los estudiantes observen el comportamiento hidráulico y el cableado del sistema durante las

prácticas. La combinación de metal y acrílico ofrece un soporte robusto y al mismo tiempo didáctico, permitiendo intervenciones seguras durante las pruebas y ajustes del prototipo.

- **Abrazaderas y soportes**

Permiten fijar la tubería y evitar vibraciones, garantizando estabilidad y seguridad durante la operación. Las abrazaderas y soportes mecánicos se emplean para fijar de manera precisa las tuberías y elementos estructurales, evitando desplazamientos o vibraciones que puedan alterar el flujo o comprometer la estabilidad del sistema. Su uso garantiza que la conducción del agua se mantenga alineada y que los sensores y actuadores trabajen bajo condiciones controladas. Además, estos elementos permiten realizar mantenimientos rápidos o reemplazos sin necesidad de desmontar completamente la estructura, contribuyendo a la funcionalidad y seguridad del prototipo en un entorno académico.

2.7. Método

En este proyecto se eligió el método inductivo, porque la idea principal fue mirar al sistema hidráulico en acción, observar cómo se comporta y registrar datos concretos como el caudal, la presión y el nivel del líquido. A partir de esas observaciones, se fueron construyendo conclusiones más amplias sobre cómo funciona el sistema y cómo puede controlarse de manera automática.

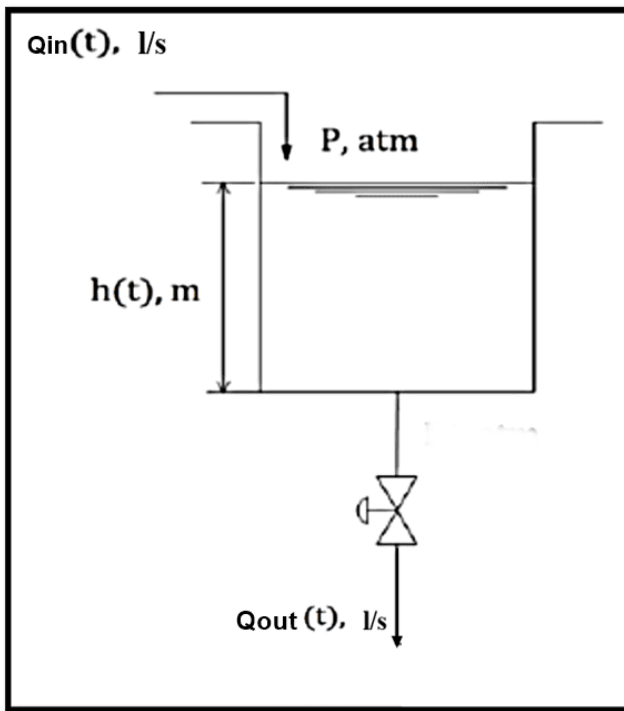
El enfoque inductivo tiene algo muy valioso: permite que las leyes y principios no se queden solo en la teoría, sino que se validen en la práctica. Por ejemplo, al variar la potencia de impulsión o al ver cómo responde la bomba frente a cambios en la señal PWM, se obtiene evidencia real que ayuda a entender el comportamiento general del sistema. Es como ir armando el rompecabezas pieza por pieza, hasta que la imagen completa del fenómeno se hace clara.

A diferencia del método deductivo, que parte de principios ya establecidos y los aplica a casos concretos, el inductivo nos da la oportunidad de descubrir y confirmar esos principios

directamente en el prototipo. Esto no solo fortalece la comprensión del fenómeno hidráulico, sino que también aporta confianza en el diseño del control automatizado, porque está respaldado por lo que realmente ocurre en el experimento. (Lafuente & Marín, 2008).

Figura 27

Esquema de Vaciado de tanque elevado



Nota: El caudal de entrada Q_{in} en litros por segundo, la altura h en metros, P la presión en la tubería, en kPa y Q_{out} el caudal de salida que varían depende del tiempo.

De esta manera, el estudio permite comprobar los principios teóricos de la hidráulica como la ecuación de Bernoulli, la ley de Pascal, la ecuación de continuidad y las pérdidas de carga, mediante la experimentación en un sistema físico real que integra sensores, válvulas, tuberías y una bomba centrífuga, controlados electrónicamente mediante dos controladores, y utilizan un sistema de comunicación RS485 para enviar la señal grafica hacia la pantalla

2.8. Procedimiento

OE1: Analizar los principios teóricos y técnicos del control de flujo y nivel de líquidos para establecer los requerimientos del prototipo.

a) Revisión bibliográfica: Se consultaron fuentes académicas, libros de hidráulica y artículos sobre la dinámica de los fluidos, caudal, nivel y sistemas de control automático, asimismo se revisó y se estudió documentación importante de los sensores usados como el sensor ultrasónico, sensor de presión y sensor de caudal. Además de los actuadores (válvula solenoide y bomba), usados en aplicaciones industriales y educativas.

b) Identificación y modelado de variables relevantes del sistema: se identificaron las magnitudes que se van a medir y controlar: el caudal de entrada (Q_{in}), el caudal de salida (Q_{out}), nivel del tanque (h), presión hidrostática en la línea de succión (P) y tiempo de llenado (t), el diámetro de la tubería, la velocidad con lo que pasa el fluido y el límite máximo de llenado del tanque superior. Se desarrollaron los modelos matemáticos que relacionan estas variables, incluyendo las ecuaciones diferenciales para el llenado y vaciado de los tanques.

c) Análisis de métodos de control: Se evaluó el control ON/OFF, PID, el control proporcional simple y el control por umbrales con ello se pudo decidir cual se ajustaba al prototipo. Finalmente se optó por lo primero priorizándolo por su simplicidad, su robustez y su capacidad de demostración en entornos como el que tenemos.

d) Definición de los requerimientos del prototipo:

A partir del análisis teórico, el modelado de variables y la evaluación de los métodos de control, se definieron los requerimientos del prototipo mediante un proceso estructurado en tres etapas: primero se realizaron pruebas experimentales de llenado y vaciado para observar el comportamiento real del sistema; luego se contrastaron los resultados con los modelos

matemáticos desarrollados; y finalmente se establecieron los parámetros mínimos necesarios para garantizar el funcionamiento correcto.

Los requerimientos obtenidos fueron los siguientes:

Potencia mínima de la bomba: Se determinó experimentalmente que el sistema requiere al menos el 41% de la potencia nominal de la bomba, controlada mediante PWM, para vencer la carga hidrostática y garantizar el llenado del tanque superior.

Rango de medición del sensor de nivel: El sensor ultrasónico utilizado tiene un rango de medición de 25 a 450 cm, por lo que se estableció que el nivel operativo del tanque superior debe mantenerse dentro de este rango para garantizar lecturas confiables.

Nivel mínimo y máximo de operación: Se definió una altura mínima de llenado de 0 cm y una altura máxima de 30 cm en el tanque superior, valores que se encuentran dentro del rango útil del sensor y que permiten operar el sistema sin riesgo de desbordamiento ni trabajo en seco de la bomba.

Tiempo de llenado en función de la potencia: Se estableció que el tiempo de llenado del tanque superior depende directamente del porcentaje de potencia suministrada a la bomba mediante PWM. A partir de las pruebas experimentales se obtuvieron los siguientes tiempos de llenado completo del tanque:

Tabla 12
Tiempo de llenado a diferente potencia de la bomba

Potencia (%)	Tiempo de llenado (s)
100%	663 s
90%	747 s
80%	1070 s
70%	1512 s

Estos resultados evidencian una relación inversamente proporcional entre la potencia suministrada y el tiempo de llenado, lo que permite seleccionar el nivel de potencia adecuado según las condiciones de operación requeridas.

Condiciones de seguridad: Se establecieron límites de operación para evitar el desbordamiento del tanque superior (nivel máximo: 30 cm) y el funcionamiento en seco de la bomba (nivel mínimo: 0 cm), garantizando así la confiabilidad y durabilidad del prototipo.

OE2: Diseñar estructural y electrónicamente todos los componentes del módulo didáctico de un sistema de llenado de tanque, incorporando sensores, actuadores y un controlador.

En esta etapa, se realizó la adquisición de cada uno de los materiales y componentes necesarios para la manufactura del prototipo. Esto implicó la compra de sensores, actuadores, controladores, materiales para la estructura física (como tubos, soportes, tanques de agua, conectores, entre otros) y cualquier otro elemento necesario para la construcción del módulo (Arce et al., 2021).

Se realizaron ajustes y recalibraciones hasta lograr una representación precisa y confiable del sistema. Esta fase también incluyó pruebas de sensibilidad para identificar los parámetros más críticos y su impacto en el rendimiento del sistema de control (Arce, 2020).

a) Diseño de la estructura de soporte y del sistema

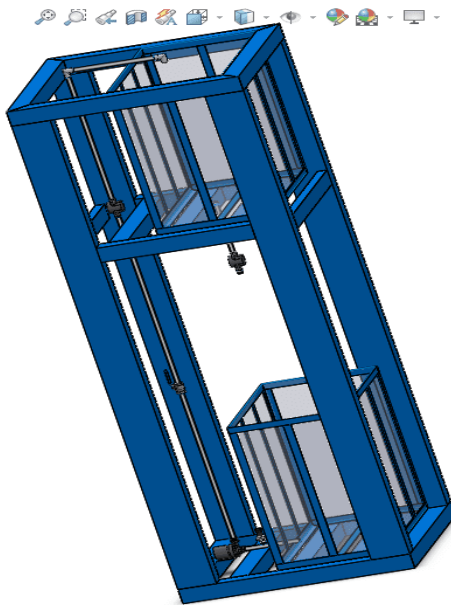
Se logró diseñar la estructura de soporte del prototipo con una base cuadrada de 30x50x60 y una altura de 1.73 m, además se agregó sus estructuras para los tanques incluidos, como se muestra en la **Fig. 28**, se hicieron los planos de montaje mecánico de los tanques, las tuberías y accesorios (ver anexo 1), todo ello para garantizar la estabilidad y su facilidad para el mantenimiento cuando se requiera. Se utilizó

herramientas de diseño asistido por computadora (SolidWorks) para crear modelos detallados del circuito y la estructura.

Una vez fabricado la estructura de procedió a colocar ruedas para su fácil movilización en el laboratorio donde se instale.

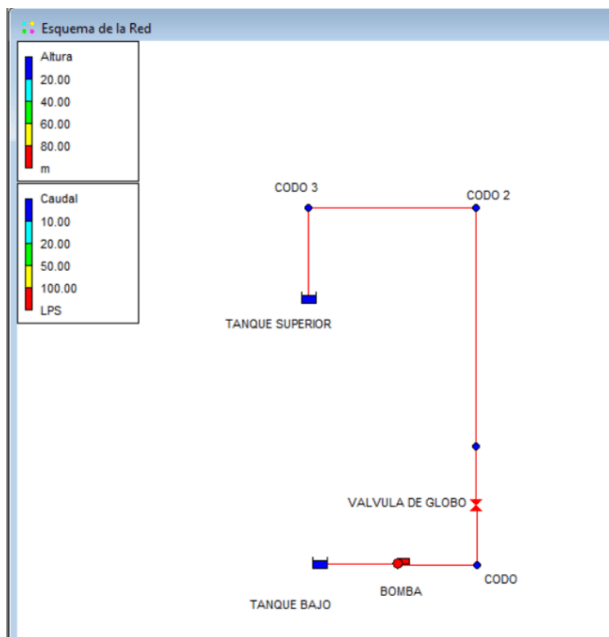
Figura 28

Diseño 3D del sistema y accesorios



En seguida se elaboró un diagrama de bloques del sistema de llenado mediante el software EPANET. Se realizó una simulación hidráulica preliminar con **EPANET** para validar flujos y presiones con la finalidad de simular en un entorno virtual antes de implementar.

Figura 29
Diagrama de Sistema hidráulico simulado



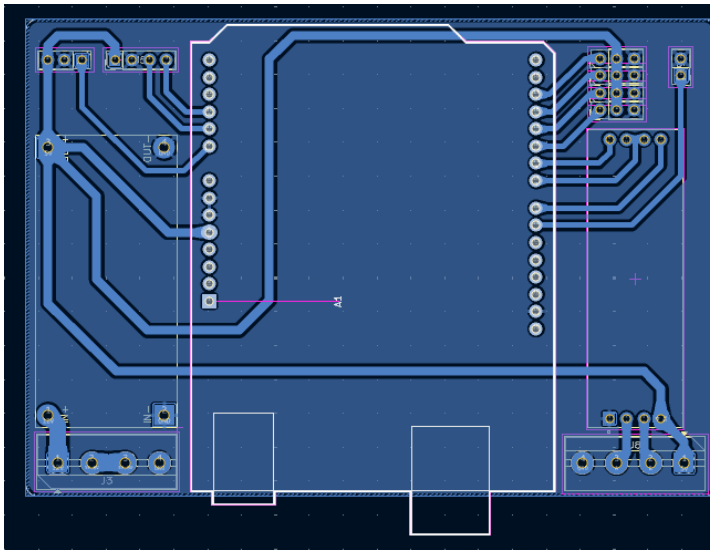
Nota: La figura muestra la simulación del flujo (preliminar) de agua que pasa por la tubería (color rojo), además se puede notar las pérdidas por accesorios. **Fuente:** elaboración propia con Open Source Software Epanet 2.2

b) Diseño del sistema de control y electrónico

Se elaboró el diagrama de bloques general del sistema, definiendo la interacción entre sensores, controladores y actuadores. Se diseñó el diagrama esquemático del circuito electrónico, especificando las conexiones entre:

Microcontroladores (Arduino Uno R3 y Arduino Pro Mini); Sensores (ultrasónico JSN-SR04T, caudalímetro YF-S201, presión HK3022, temperatura DHT22); Actuadores (bomba 12VDC, válvula solenoide) y sus drivers (módulo MOSFET); Módulos de comunicación (RS485) y conversión de nivel (XL4005); Fuente de alimentación (12V/5V).

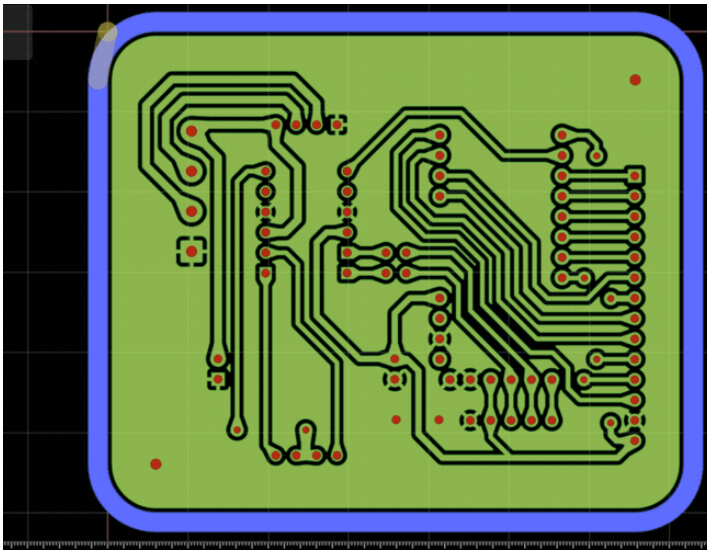
Figura 30
Diseño de la placa de control



c) Diseño de la placa de montaje

Con los materiales y componentes en mano, se procedió a la construcción del prototipo físico. El diseño de la placa se hizo con el OSS (Open Source Software) de KiCad, en seguida estos archivos son exportados e impresos constituyéndose así la fabricación de la placa PCB. Esto incluyó el ensamblaje de la estructura, la instalación de los sensores y actuadores, y la interconexión de todos los componentes según el diseño del circuito. Al finalizar el trabajo en el software, se exporta en formato Gerber para mediante Flat CAM ser procesados por la maquina CNC encargada de esculpir las placas físicas. Se realizó las pruebas iniciales con cada uno de los sensores para visualizar que todos los componentes estén instalados correctamente y funcionen adecuadamente.

Figura 31
Diseño flat CAM listo para imprimir



c) Selección de los sensores y actuadores

Selección de sensores

1 Se seleccionó un sensor de nivel, también conocido como sensor tipo ultrasónico JSN-SR04T para poder medir el nivel de descarga del tanque superior ya que es de bajo costo. Según Naylamp Mechatronics s/f, este es un sensor de distancia que utiliza ultrasonido (sonar) para determinar la distancia de un objeto en un rango de 25 a 450 cm. Destaca especialmente por su resistencia al agua, pequeño tamaño, bajo consumo energético y buena precisión. Perfecto para aplicaciones donde el sensor estará expuesto a la intemperie/humedad/agua.

Se seleccionó el Sensor de flujo de agua de 1/2 " YF-S201 también conocidos como medidores o sensores de caudal, medidores de flujo o flujómetros, es un instrumento para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido. El caudal es la cantidad de líquido o fluido (volumen) que circula a través de una tubería por unidad de tiempo, por lo general se expresa en: litros por minutos (l/s) o metros cúbicos por hora (m³/h). Los caudalímetros suelen colocarse directamente en la tubería que transporta el fluido como en nuestro caso que se colocó después de la bomba y otro a la salida del desagüe para

saber cuánto caudal se está expulsando del tanque de arriba. Se seleccionó el sensor de temperatura DHT22 porque tiene un buen rendimiento y bajo costo, contiene un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir la temperatura ambiente, el cual muestra los datos en la pantalla de visualización.

Además, se seleccionó un Sensor de presión o transductor, es muy habitual encontrarlos en muchos procesos industriales cuya misión es transformar una magnitud física en una eléctrica, en este caso transforman una fuerza por unidad de superficie (presión) en un voltaje proporcional a la presión ejercida, que se mostrará en nuestra pantalla de datos al momento de su funcionamiento, la salida del sensor es un voltaje analógico que varía linealmente desde 0.5V para 0 MPa hasta 4.5V para 0.8Mpa. Esta salida analógica es compatible con las entradas analógicas (ADC) de Arduino, es muy común hallarlo en aplicaciones de neumática como este.

Selección de válvulas de globo

Tomando en cuenta su versatilidad y su diámetro se optó por elegir la de $\frac{1}{2}$ " , porque la válvula solenoide con control de apertura o cierre que existían en el mercado eran de $\frac{1}{4}$ y para nuestro fin, no satisfacía nuestra expectativa, lo que conllevaría a que al momento de hacer la graduación para el nivel de ON/OFF de la válvula se hizo de forma manual (mecánica). Y solo se usó una válvula para el desagüe del tanque inferior.

Determinación la válvula solenoide

Se determinó que se usara una válvula solenoide de $\frac{1}{2}$ " , pero no se tomó en cuenta que había con dos tipos de presión diferentes, debido a que el sistema consta con tuberías media pulgada, se adquirió la válvula sin fijarnos en la presión soportada, se tuvo el inconveniente que la válvula obtenida trabajaba en alta presión y para el prototipo que se hizo solo necesitábamos de baja presión, así que se tuvo que cambiar para recién

obtener la apertura de la válvula al mandarle la orden desde los comandos de Arduino, obteniendo al final un resultado satisfactorio.

Selección de la bomba

Considerando las siguientes condiciones en el sistema de tuberías.

- La bomba utilizada tiene un caudal nominal de 800 L/h (según especificación técnica del fabricante)

$$Q = 800 \frac{l}{h} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{h}{3600 s} = 2.22 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (17)$$

- Diámetro de la tubería = ½ in = 15.80 mm ó 0.01580 m (ver anexo 2)
- La velocidad del fluido en el sistema es;

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2.22 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi(0.01580)^2}{4}} = 1.13226718 m/s \quad (18)$$

Se optó por elegir una electrobomba de 12 VDC de agua de 1/2", con la que se impulsa agua del tanque inferior hacia el tanque superior, este dispositivo fue suficiente para demostrar los parámetros requeridos. Esta bomba es de tamaño reducido, de bajo consumo eléctrico, silenciosa, diseñada para trabajar en modo continuo, su motor interno es de tipo sin escobillas (brushless) lo que asegura una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento. Según indica Naylamp Mechatronics s/f. esta es utilizada en aplicaciones como: riego automatizado, dosificación, llenado de tanques (control de nivel), acuarios, refrigeración por agua y más. Es de 12 voltios de corriente continua. Funcionan con energía de la batería. Estas bombas son maravillosamente fiables y muy fáciles de mantener, pero no tienen ninguna función que permita al usuario limitar el uso de agua o de energía, lo que lleva a algunos entusiastas del camping libre a actualizar a una bomba inteligente en su lugar.

d) Selección componentes adicionales

Tuberías

Se seleccionó tuberías y conexiones de 1/2"(media pulgada) para no tener que estar usando reducciones u otros accesorios, debido a que los sensores eran compatibles con ese tipo de especificaciones.

Fijando el número de tanques

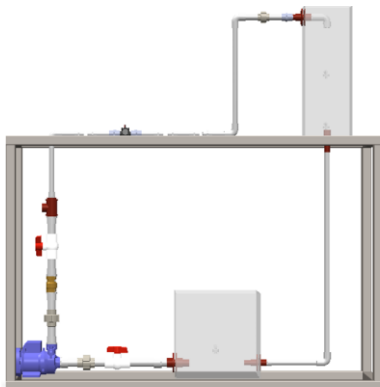
Para este punto se concluyó que nuestro sistema debe tener dos tanques de igual dimensión, para facilitar un ciclo de agua infinito, devolviendo agua que se vacía por el desagüe, a través de la bomba hacia el tanque superior; fijados en la estructura uno sobre de otro con una separación de 0.7 metros, estos tanques están construidos con platinas de hierro de 3/4" x 1/8" en las 4 esquinas y los cuatro lados de la base del tanque con ángulos de la misma dimensión de hierro.

Se tuvo en cuenta el modelo utilizado por Martinez & Ochoa (2023), donde los tanques están ubicados uno sobre el otro, pero con diferente forma de estructura.

Se tomo la consideración que, si la temperatura bajara a menos de 25°C, esta se mantendrá en ese valor para no afectar la toma de datos. Conforme los sensores van entregando sus datos estos se van mostrando en la pantalla de visualización en tiempo real.

Figura 32

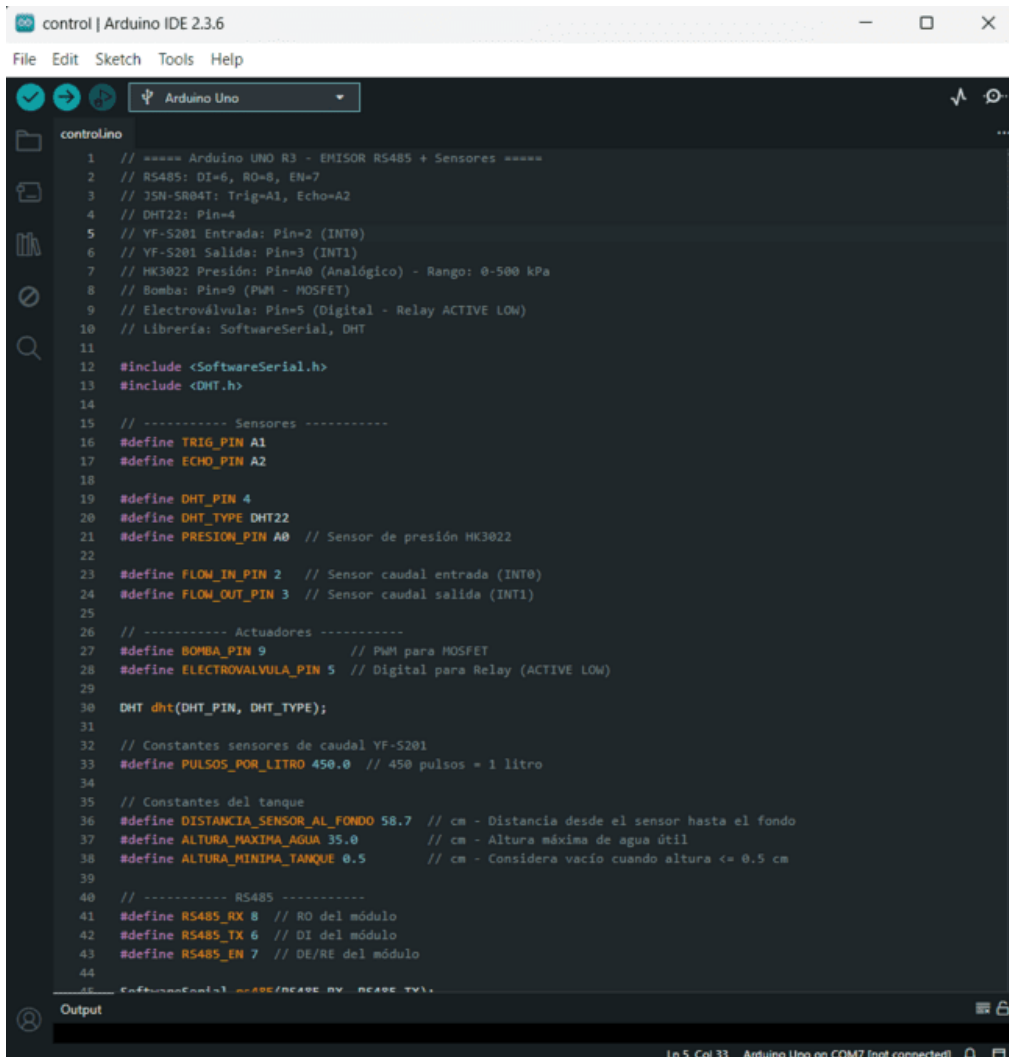
Modelo referencial de la ubicación de los tanques



Nota: Tomado de Martinez & Ochoa (2023),

Se utilizó el entorno de desarrollo IDE, porque este nos permite que permite escribir, compilar y cargar el código directo en el microcontrolador. Con ello se puede controlar el sistema.

Figura 33
Programación en la plataforma Arduino IDE 2.3.6



```
control | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help
controlino
1 // ===== Arduino UNO R3 - EMISOR RS485 + Sensores =====
2 // RS485: DI=6, RO=8, EN=7
3 // J5N-SR04T: Trig=A1, Echo=A2
4 // DHT22: Pin=4
5 // YF-S201 Entrada: Pin=2 (INT0)
6 // YF-S201 Salida: Pin=3 (INT1)
7 // HK3022 Presión: Pin=A0 (Analógico) - Rango: 0-500 kPa
8 // Bomba: Pin=9 (PWM - MOSFET)
9 // Electroválvula: Pin=5 (Digital - Relay ACTIVE LOW)
10 // Librería: SoftwareSerial, DHT
11
12 #include <SoftwareSerial.h>
13 #include <DHT.h>
14
15 // ----- Sensores -----
16 #define TRIG_PIN A1
17 #define ECHO_PIN A2
18
19 #define DHT_PIN 4
20 #define DHT_TYPE DHT22
21 #define PRESION_PIN A0 // Sensor de presión HK3022
22
23 #define FLOW_IN_PIN 2 // Sensor caudal entrada (INT0)
24 #define FLOW_OUT_PIN 3 // Sensor caudal salida (INT1)
25
26 // ----- Actuadores -----
27 #define BOMBA_PIN 9 // PWM para MOSFET
28 #define ELECTROVALVULA_PIN 5 // Digital para Relay (ACTIVE LOW)
29
30 DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);
31
32 // Constantes sensores de caudal YF-S201
33 #define PULSOS_POR_LITRO 450.0 // 450 pulsos = 1 litro
34
35 // Constantes del tanque
36 #define DISTANCIA_SENSOR_AL_FONDO 58.7 // cm - Distancia desde el sensor hasta el fondo
37 #define ALTURA_MAXIMA_AGUA 35.0 // cm - Altura máxima de agua útil
38 #define ALTURA_MINIMA_TANQUE 0.5 // cm - Considera vacío cuando altura <= 0.5 cm
39
40 // ----- RS485 -----
41 #define RS485_RX 8 // RO del módulo
42 #define RS485_TX 6 // DI del módulo
43 #define RS485_EN 7 // DE/RE del módulo
44
45 SoftwareSerial RS485(RS485_RX, RS485_TX);
Ln 5, Col 33 Arduino Uno on COM7 [not connected]
```

Para el caso de la pantalla se usó el microcontrolador Arduino pro Mini, por su tamaño compacto, robustez y fiabilidad que tiene, este microchip se encarga del control exclusivamente de la misma.

OE3: Ensamblar la estructura, las tarjetas electrónicas y todos los componentes del módulo didáctico, incorporando sensores, actuadores y controladores electrónicos y programar los sistemas electrónicos.

Fabricación y Montaje de componentes

Se fabricó la estructura metálica mediante corte y soldadura de tubos cuadrados, y se instaló el panel de acrílico. Se construyeron los tanques superiores e inferiores con hechas de láminas metálicas y angulas en los filos o lados, se cortó y se ensamblo las tuberías de PVC.

Figura 34

Estructura mecánica



Finalmente se fabricó la PCB mediante fresado CNC a partir de los archivos Gerber generados en KiCad.

Figura 35
Elaboración de PCB



Ensamblaje físico del sistema

Se montaron los tanques en la estructura, luego se instaló el circuito hidráulico: tuberías, bomba, válvulas y accesorios, asegurando todas las conexiones con abrazaderas. Se pegaron con pegamento para PVC y conectaron todos los componentes electrónicos en la PCB. Se integraron los sensores y actuadores en sus ubicaciones designadas y se realizó el cableado hacia la PCB y las tarjetas de Arduino.

Integración con el sistema de control y programación de los sistemas embebidos

La alimentación general esta se hizo con una fuente de voltaje de 12 V. detallada en la sección de materiales, enseguida, los sensores fueron conectados a los controladores electrónico, se programó Arduino uno R3(control Principal) para: leer las señales de todos los sensores (analógicas y digitales), implementar la lógica de control ON/OFF automática para mantener el nivel en el setpoint, para generar la señal PWM para el control manual de la velocidad de la bomba, para gestionar la válvula solenoide para el drenado de emergencia y para comunicarse con la pantalla HMI vía el módulo RS485.

Por otro lado, también se programó Arduino Pro Mini (Control de Pantalla/HMI) para: gestionar la interfaz gráfica, recibir datos del control principal y mostrarlos en tiempo real (nivel, caudal, presión, temperatura, estado del sistema).

Tabla 13
Tabla de asignación de pines

Componente	Señal / Función	Pin Arduino Uno R3
YF-S201 – Caudalímetro 1	Pulso	D2 (INT0)
YF-S201 – Caudalímetro 2	Pulso	D3 (INT1)
DHT11 / DHT22 (KY-015)	Datos	D4
Driver MOSFET AOD4184A	PWM / ON-OFF	D9 (PWM)
JSN-SR04T (TRIG)	TRIG	A1 (D15)
JSN-SR04T (ECHO)	ECHO	A2 (D16)
HK3022 – Sensor de presión	Salida analógica	A0
MAX485 – RE/DE	Control dirección	D6
MAX485 – RO → RX	Recepción	D8
MAX485 – DI → TX	Transmisión	D7
Reservado (SPI)	D10–D13	Reservado

OE4: Evaluar las mediciones del cálculo teórico versus el sistema real para evaluar su precisión y desempeño en escenarios educativos.

Ejecución de pruebas unitarias y de integración

Se probó individualmente cada sensor y actuador para ver su influencia en carga y descarga, se verificó el circuito hidráulico, se probó la comunicación entre los microcontroladores y la pantalla, se varió la altura del nivel en el tanque superior, para ver su influencia en la descarga, se hizo pruebas variando la potencia de operación de la bomba, mediante PWM, para ver su implicancia en el tiempo de llenado, se registraron valores de caudal, presión y nivel bajo

diferentes condiciones operativas, con el fin de caracterizar el comportamiento dinámico del sistema. Esta etapa también incluyó la documentación del proceso de construcción y programación del prototipo.

Ejecución de ensayos experimentales y recolección de datos

Se realizaron múltiples ciclos de operación bajo diferentes condiciones

Llenado automático: Midiendo el tiempo para alcanzar diferentes setpoints de nivel.

Control ON/OFF: Evaluando la precisión en el mantenimiento del nivel y el historial de ciclos de la bomba.

Control manual por PWM: Variando el duty cycle y midiendo el caudal resultante con el sensor YF-S201.

Descarga por gravedad: Midiendo el caudal de salida en función del nivel en el tanque, para contrastar con la Ley de Torricelli.

Se registraron en tiempo real los datos de nivel, caudal, presión y tiempo.

Análisis y comparación de datos (validación teórica práctica)

Se compararon datos experimentales (como tiempo de llenado vs. Nivel) se compararon con las predicciones de los modelos matemáticos desarrollados en la Etapa 1.

Se calcularon indicadores de desempeño como error en estado estacionario, sobre impulso y tiempo de respuesta, se analizó la relación entre la señal PWM y el caudal medido, comparándola con la curva teórica de la bomba.

Los datos fueron analizados exhaustivamente para identificar algunos patrones, tendencias o cualquier anomalía suscitada. Se utilizaron herramientas estadísticas y de análisis de datos para procesar, con ello se presentan los datos obtenidos de una manera didáctica, clara y comprensible.

Con base en el análisis de los datos experimentales, se realizaron ajustes y optimizaciones en el prototipo para mejorar su rendimiento. Esto incluyó modificaciones en los parámetros del sistema de control, ajustes mecánicos en el prototipo, o cambios en los procedimientos operativos. Se llevaron a cabo iteraciones de ensayo y ajuste hasta lograr un mejor rendimiento del prototipo. La optimización se documentó cuidadosamente para proporcionar una guía clara sobre las mejoras realizadas.

2.9. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el registro de la información se emplearon técnicas de medición directa, basadas en sensores y equipos electrónicos, los cuales permiten obtener datos confiables y cuantificables.

Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

Sensor de flujo: Mide el caudal volumétrico del fluido, permitiendo la aplicación práctica de la ecuación de continuidad.

Sensor de presión: Registra la presión en la línea de impulsión, relacionando las mediciones con la ley de Pascal y la ecuación de Bernoulli, permitiendo identificar el correcto funcionamiento de la bomba.

Sensor de nivel: Detecta la altura del agua en el tanque superior, aplicando el principio de presión hidrostática.

Controlador electrónico (microcontrolador): Recibe y procesa las señales de los sensores, gestionando la operación de la bomba y la válvula de control.

Software de monitoreo (EPANET, Excel, Matlab, Python): Permite visualizar el comportamiento hidráulico del sistema y analizar la variación de presiones y caudales.

Los datos obtenidos se organizaron en tablas y gráficos, permitiendo analizar el desempeño del sistema y contrastar los valores experimentales con los teóricos.

2.10. Registro y análisis de datos obtenidos

El registro y análisis de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales del prototipo se realizó mediante un enfoque sistemático que combinó la adquisición automatizada de datos, su procesamiento mediante software Arduino IDE, Excel y Python, y su comparación con los modelos teóricos desarrollados. Este proceso constó de las siguientes etapas:

a) Adquisición y registro de datos

Medición automatizada: Los datos fueron adquiridos en tiempo real por el sistema de control principal (Arduino Uno R3), el cual muestreó las señales de los sensores a intervalos regulares (cada 1 segundo). Las variables registradas incluyeron:

Nivel del tanque (h): En centímetros [cm], medido por el sensor ultrasónico JSN-SR04T.

Caudal de entrada (Q_{in}): En litros por minuto [L/min], medido por el caudalímetro YF-S201 ubicado después de la bomba.

Caudal de salida (Q_{out}): En [L/min], medido por un segundo caudalímetro YF-S201 en la línea de descarga (para ensayos específicos).

Presión en la línea de succión (P): En kilopascales [kPa] o metros de columna de agua [mca], medido por el sensor de presión HK3022.

Tiempo (t): En segundos [s], registrado por el reloj interno del microcontrolador.

Estado de los actuadores: Encendido/Apagado de la bomba y apertura/cierre de la válvula solenoide.

Protocolo de almacenamiento: Los datos fueron transmitidos por medio del puerto serial a una computadora personal mediante el protocolo RS485 y almacenados en hojas de cálculo (.csv) utilizando un script simple en el IDE de Arduino o en Python. Cada archivo correspondió a un ensayo experimental específico ("Llenado _al_100_30cm.csv").

b) Procesamiento y organización de datos

Limpieza y validación: Los datos brutos fueron depurados para eliminar posibles valores atípicos (outliers) causados por interferencias momentáneas mayormente por salpicaduras de agua, utilizando filtros de media móvil simple cuando fue necesario.

Organización: Los datos de cada ensayo fueron organizados en tablas con columnas claramente etiquetadas (Tiempo, Altura o nivel, Caudal, Presión, Estado de Bomba y válvula) para facilitar su análisis.

Cálculo de variables derivadas: A partir de los datos medidos, se calcularon variables de interés para el análisis:

Volumen acumulado: $V(t) = A_{\text{tanque}} * h(t)$, donde A_{tanque} es el área transversal del tanque superior.

Error del sistema: $e(t) = \text{Nivel_Setpoint} - h(t)$.

Tiempo de respuesta: Tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta que el nivel alcanza y se mantiene dentro de una banda del $\pm 5\%$ del setpoint.

c) Análisis de datos

El análisis se centró en contrastar el comportamiento real del sistema con las predicciones de los modelos teóricos, utilizando las siguientes técnicas y herramientas:

Análisis gráfico comparativo (Validación Teórico-Práctica):

Se graficó, utilizando Microsoft Excel y Python (Matplotlib), la evolución temporal de las variables clave (nivel vs. tiempo, caudal vs. Tiempo en diferentes regímenes de potencia de la bomba).

En las mismas gráficas, se superpuso la curva teórica predicha por el modelo matemático de la ecuación $dh/dt = Q_{\text{in}} / A$ para el llenado.

Este devenir visual agradable permitió evaluar cualitativamente la precisión del modelo y del prototipo, identificando desviaciones y sus posibles causas (pérdidas no modeladas, retardos en los actuadores).

Validación de principios físicos:

Ecuación de Continuidad: Se verificó que, en estado estacionario con la válvula de descarga cerrada, el caudal medido por el sensor (Q_{in}) se correspondiera con el cambio de volumen derivado de la medición de nivel ($A * \Delta h / \Delta t$).

Ley de Torricelli (Descarga): En ensayos de vaciado, se comparó el caudal de salida medido (Q_{out}) con el valor teórico calculado a partir del nivel instantáneo $h(t)$ usando la ecuación $Q_{teorico} = C_d * a * \sqrt{2gh}$. Se ajustó el coeficiente de descarga C_d para lograr el mejor ajuste entre los datos reales y el modelo.

27

Herramientas de software: Para el análisis avanzado y el ajuste de curvas, se utilizó Python con librerías como Pandas (manejo de datos), NumPy (cálculos numéricos) y SciPy (optimización y ajuste de parámetros de modelos).

III. RESULTADOS

3.1. OE1: Análisis de principios teóricos de control de flujo y nivel.

Parámetros Geométricos del Sistema

El primer paso del análisis teórico fue definir las dimensiones físicas del tanque de estudio (tanque elevado), las cuales determinan la capacitancia del sistema, se determinó las siguientes medidas de los tanques:

- **Largo (a) :** 48 cm (0.48 m)
- **Ancho (b) :** 30 cm (0.30 m)
- **Altura del tanque (c) :** 60 cm (0.60m)
- **Altura Máxima a llenar(h_{max}) :** 30 cm (0.30 m)

Cálculo del Volumen Total a cargar (V)

El volumen de agua a cargar es el volumen de la base por la altura máxima:

$$V = A_{tanque} * h_{max} \quad (17)$$

Donde

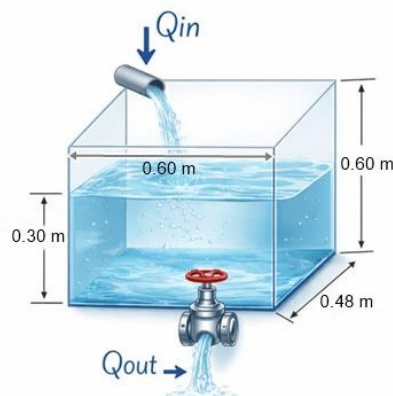
$$\text{Área de la base del Tanque } (A_{tanque}) = a * b = 0.144 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura Máxima } (h_{max}) = 0.30 \text{ m}$$

$$V = 1.144\text{m}^2 * 0.30 \text{ m} = 0.0432 \text{ m}^3$$

- **Volumen Total a cargar (V):** 0.0432 m³ (43.2 litros)

- **Figura 36**
Dimensiones del tanque



Modelamiento Matemático Lineal de Carga

Para el proceso de llenado, el análisis teórico cumplió con establecer una ecuación de continuidad simplificada. Al asumir un caudal de entrada constante (Q_{in}) y un fluido incompresible, el modelo se define como una recta de pendiente constante:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} \quad (18)$$

Integrando para una altura inicial de 0 m el modelo teórico resultante es :

$$h(t) = \frac{Q_{in}}{A} t + h_o \quad (19)$$

Donde la pendiente de la gráfica Altura vs. Tiempo representa la relación directa entre el caudal de la bomba y el área del tanque. Este análisis permitió establecer que cualquier variación en la potencia de la bomba (PWM) se traduce en un cambio proporcional en la velocidad de ascenso del nivel, simplificando el control para fines didácticos. Este análisis permitió validar que el proceso de carga se comporta como un sistema lineal de primer orden, donde el nivel aumenta uniformemente con el tiempo siempre que el caudal de la bomba sea fijo.

Modelamiento de la Descarga y Ley de Torricelli

El cumplimiento del análisis teórico también incluyó la caracterización del vaciado por gravedad. Se determinaron los siguientes valores técnicos:

- Diámetro de tubería: ½ pulgada (15.8mm.)
- Área del orificio (a): $= \pi(0.0625)/4 = 1.960067 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.
- Coeficiente de descarga (C_d): 0.65 (valor típico según Mott, R. (2006).)

La ecuación completa de descarga obtenida por el prototipo según el modelo elegido es

$$Q_{out}(h) = 1.2744 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot h} \quad (19)$$

Simplificando:

$$Q_{out}(h) = 3.49 \times 10^{-4} \sqrt{h} \quad (m^3/s) \quad (20)$$

3.2. OE2: Diseño estructural y electrónico de los componentes

Figura 37

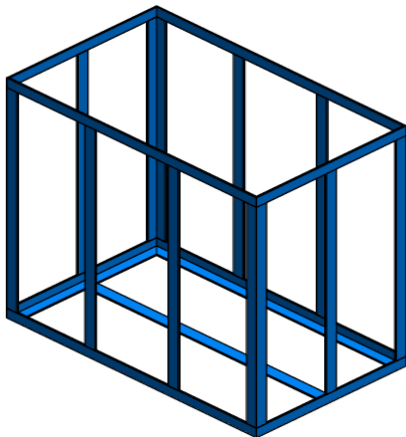
Diseño 3D de la estructura de soporte comparado con lo fabricado



Se diseñó la estructura mediante el software SOLIDWORKS, especificando las medidas necesarias para la configuración óptima del prototipo, mostrando el tanque superior e inferior que serán llenados de agua.

Figura 38

Diseño 3D de los tanques de agua.



Nota: *Se muestra el tanque desacoplado de la estructura, en seguida se adhirió el acrílico a sus 4 lados y además a la base.*

Modelado de sistema de tanques mediante Python

Figura 39
Código en Python

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # --- 1. Constantes y Parámetros ---
6 g = 9.81 # Gravedad (m/s^2)
7 Cd = 0.65 # Coeficiente de descarga
8 D_orificio = 0.0127 # Diámetro del orificio (m)
9 L1_tanque = 0.48 # Largo del tanque (m)
10 L2_tanque = 0.30 # Ancho del tanque (m)
11 h_inicial = 0.30 # Altura inicial (m)
12
13 # --- 2. Cálculos de Áreas ---
14 a = np.pi * (D_orificio**2) / 4
15 A_tanque = L1_tanque * L2_tanque
16
17 # --- 3. Simulación Paso a Paso de la Descarga ---
18 h = h_inicial
19 t = 0
20 dt = 5.0 # Paso de tiempo de 5 segundos
21 resultados = []
22
23 while h >= 0:
24     # Si la altura es cero, el caudal es cero
25     if h == 0:
26         Q_out = 0
27     else:

```

Se realizó el diagrama de conexiones del sistema de control y de la pantalla, cada uno adaptado a su microcontrolador y sus reguladores de voltaje, para su óptimo rendimiento, además de las interfaces de comunicación como la pantalla HMI y el módulo RS485 que se encarga de traducir la señal de un nivel de voltaje a otro.

Figura 40
Esquematización del diseño del sistema

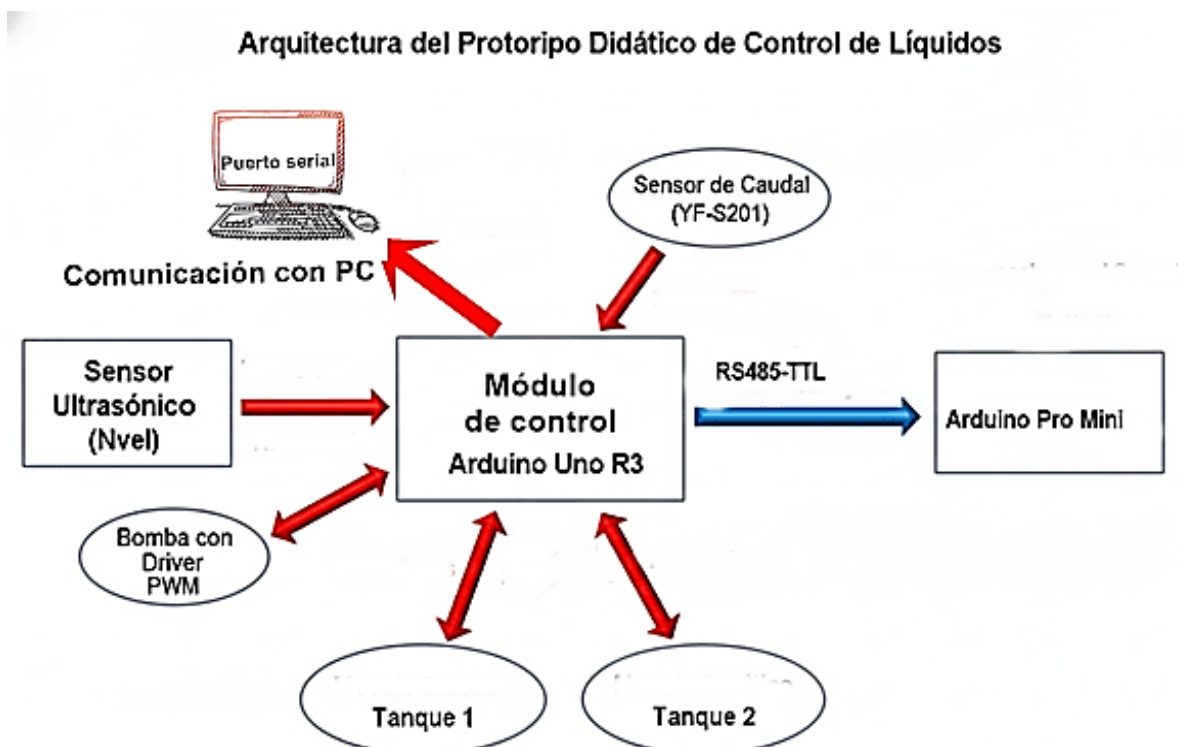
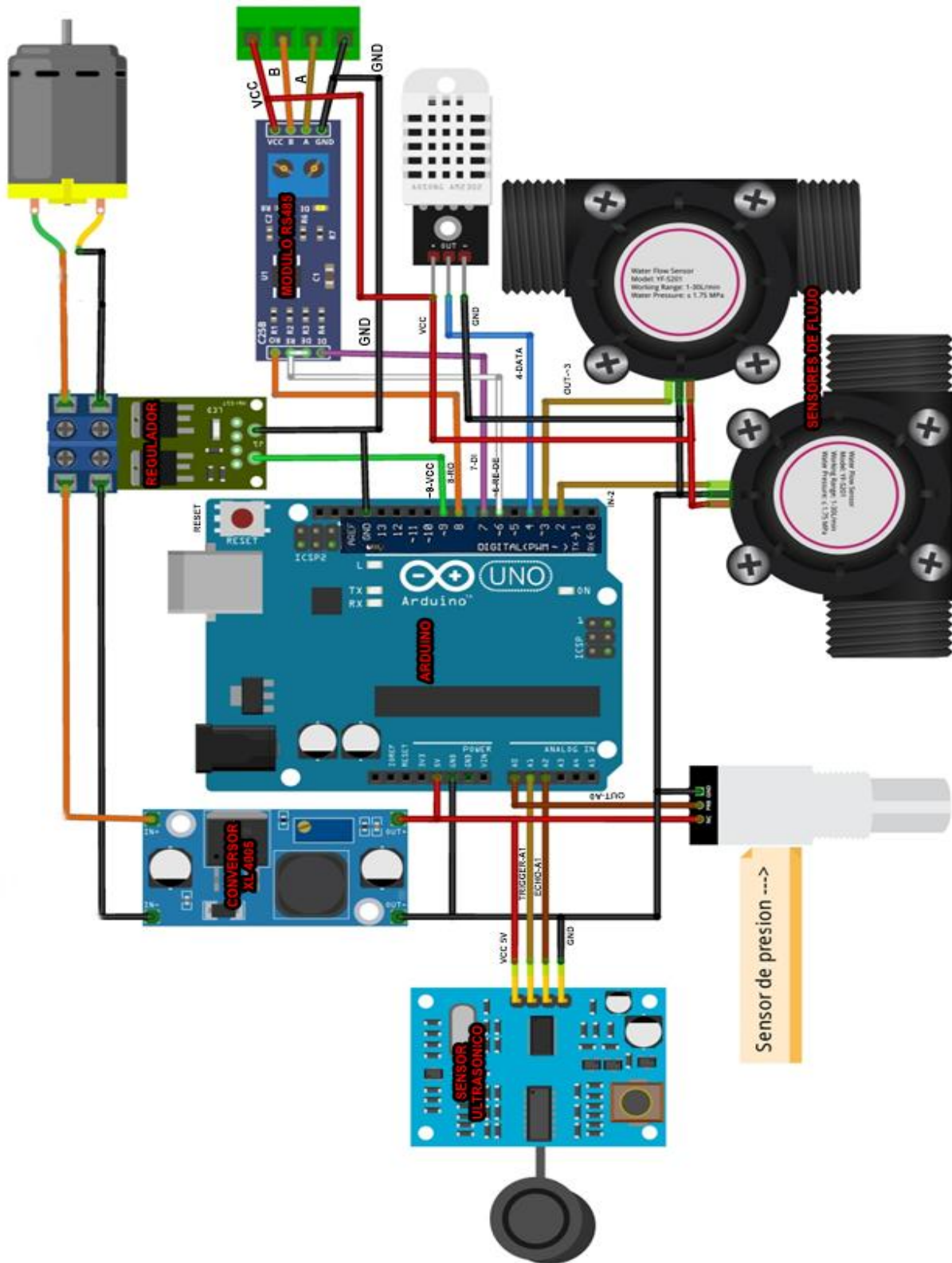
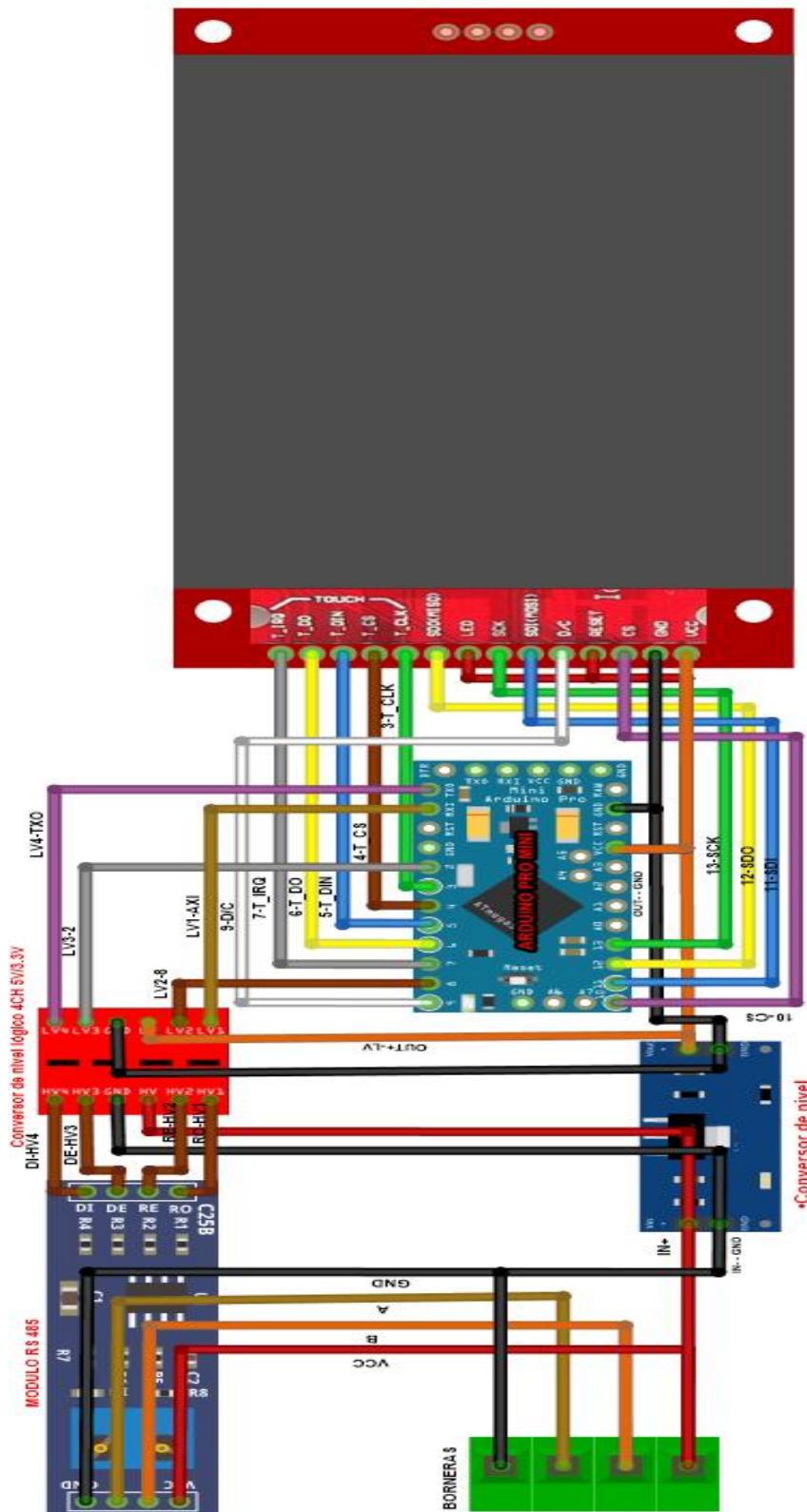


Figura 41
Diagrama de conexiones de control



Se observa todas las conexiones entre componentes de la unidad de control del sistema.

Figura 42
Diagrama de conexiones de la pantalla



Aquí se detalla las conexiones realizadas para poder comunicar al microcontrolador Arduino Pro Mini con la pantalla y con la central de procesos que es el lazo de control del sistema

3.3. OE3: Manufactura de modulo y ensamble de tarjetas electrónicas

Acondicionamiento de estructura de fierro y bases para tanques.

Se llevo a cabo la manufactura de la base de fierro, cortes metálicos y adaptado a nuestro modelo de estructura ya dibujado en SOLIDWORKS.

Figura 43

Soldado y manufactura de estructura metálica



Nota. los cortes y posterior soldadura de acuerdo a las medidas proporcionadas

Figura 44

Recorte de acrílico



Se recortó la plancha de acrílico adquirida a la medida necesaria

Con estas medidas recortadas de acuerdo a las dimensiones de la caja metálica de los tanques que se tenía. Se tuvo una ligera dificultad ya que se pensó que ese material iba a ser mejor trabajable que el vidrio, además implicaba trasladarlo.

Figura 45

Base de tanque con acrílico acondicionado



Se recortó con precisión los retazo de acrílico transparente, para no romper dicho material, para que calce perfectamente en el interior del tanque.

Figura 46

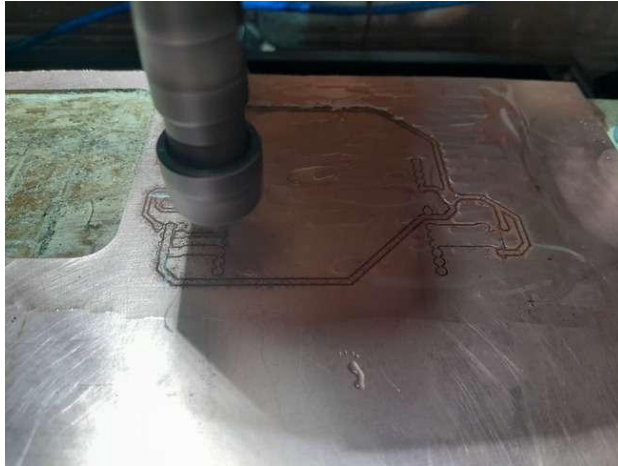
Módulo final manufacturado



Fabricación de PCB y conexión de componentes

Figura 47

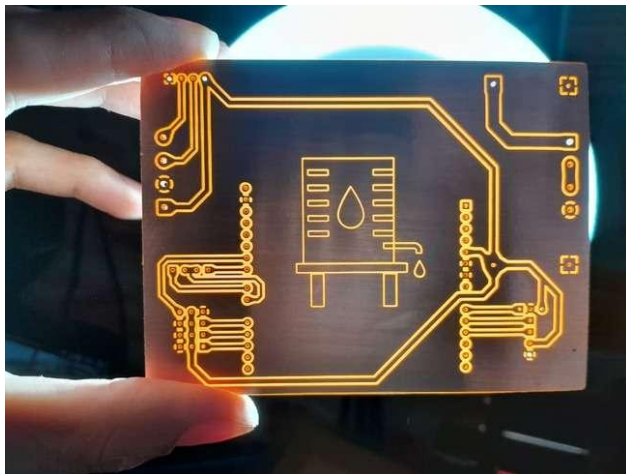
Fabricación de PCB



Se imprimió los detalles de las conexiones de acuerdo al archivo generado en KiCad

Figura 48

Placa PCB



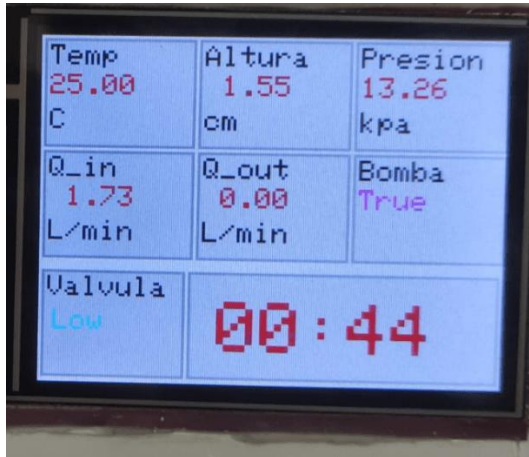
Nota. Placa con el diseño final, lista para empezar a integrar cada componente electrónico.

Se implementó el prototipo físico, el cual cumple con las especificaciones de bajo costo y modularidad, utilizando un microcontrolador Arduino Uno R3 y comunicadores RS485-TTL. La integración de la pantalla táctil separada (controlada por el Pro Mini), se

demonstró la capacidad didáctica del sistema para aislar la Interfaz Humano-Máquina (HMI) de la lógica de control principal.

Figura 49

Vista de datos en tiempo real



Los datos que se miden se pueden ver en tiempo real en la pantalla HMI

Figura 50

Esquema de modulo implementado



Esquema del modulo implementado, se muestr al lado de un escritorio, que es donde se apoya la computadora a la que se transfiere los datos obtenidos mediante su puerto COM.

3.4. OE4: Evaluación de mediciones teóricas versus sistema real

Caracterización de la bomba

La validación se realizó mediante pruebas en lazo abierto y lazo cerrado, contrastando el comportamiento teórico del sistema con las mediciones reales. Siguiendo los parámetros de la ecuación de modelado, se procedió a evaluar la bomba.

Para los fines de control que utilizamos, se simplifica a lo siguiente:

PWM → **Voltaje** → **RPM** → **Caudal**

- **Variable de Entrada (Control):** $u(t) = \text{PWM}$ (Duty Cycle, rango 0-255).
- **Variable de Salida (Proceso):** $y(t) = Q$ (Caudal en L/m).
- **Ecuación General:** Modelo lineal del caudal, en función del voltaje aplicado.

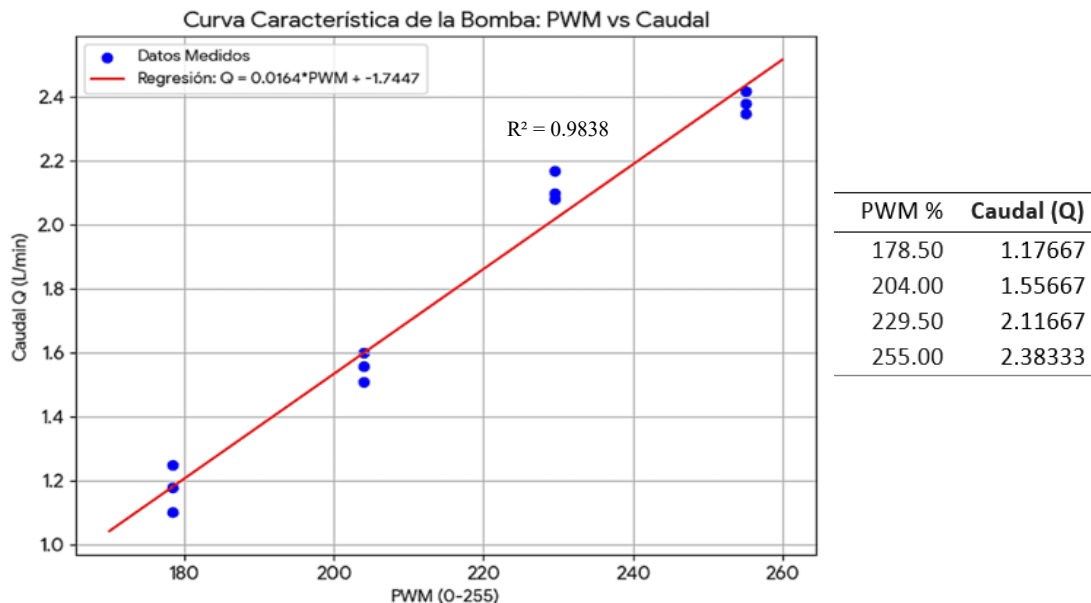
$$Q_{in} = f(v) \tag{30}$$

Entonces

$$Q = m(\text{PWM}) + b \tag{31}$$

Donde: Pendiente es m, Intersección es b

Figura 51
Caracterización de la bomba



La Figura 51 presenta la curva característica de la bomba, obtenida mediante regresión lineal de los datos experimentales (Caudal vs. Ciclo de trabajo PWM). Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) = 0.9838, lo que indica una alta linealidad en la región de operación.

La ecuación resultante:

$$Q = 0.0164 * PWM - 1.745$$

- Pendiente(m): 0.016392078
- Intersección (b): -1.744648

Revela una intersección negativa con el eje Y, identificando físicamente una 'Zona Muerta' operativa. Esto implica que la bomba requiere un PWM mínimo de aproximadamente 106 (41% de potencia) para vencer la fricción estática e iniciar el bombeo, un parámetro crítico considerado en la estrategia de control.

La **Zona Muerta" (Dead Zone)**. Es el rango entre 0 y PWM_{min} , donde la bomba no entrega trabajo. Usando nuestra ecuación, podemos calcular el PWM mínimo de arranque.

$$0 = 0.0164 * PWM - 1.745$$

$$PWM_{min} = \frac{1.745}{0.0164} = 106.4$$

Esto indica que la bomba físicamente arranca con 41% del PWM, esta caída es atribuible a la fricción mecánica y la caída de voltaje bajo carga, pero como en este caso al elevar el agua no se logra concretar toda su eficiencia, se recomienda operar a un mínimo de 70%.

Mediciones realizadas experimentalmente para el llenado del tanque

Tabla 14

Caudales y voltajes en función del PWM

PRIMERA MEDICIÓN			
PWM %	PWM (0-255)	Voltaje (V)	Caudal (Q L/s)
70%	178.50	9.4	0.03
85%	216.75	10.37	0.05
100%	255.00	12.1	0.07

SEGUNDA MEDICIÓN			
PWM %	PWM (0-255)	Voltaje (V)	Caudal (Q)
70%	178.50	9.4	0.03
85%	216.75	10.30	0.05
100%	255.00	12.12	0.07

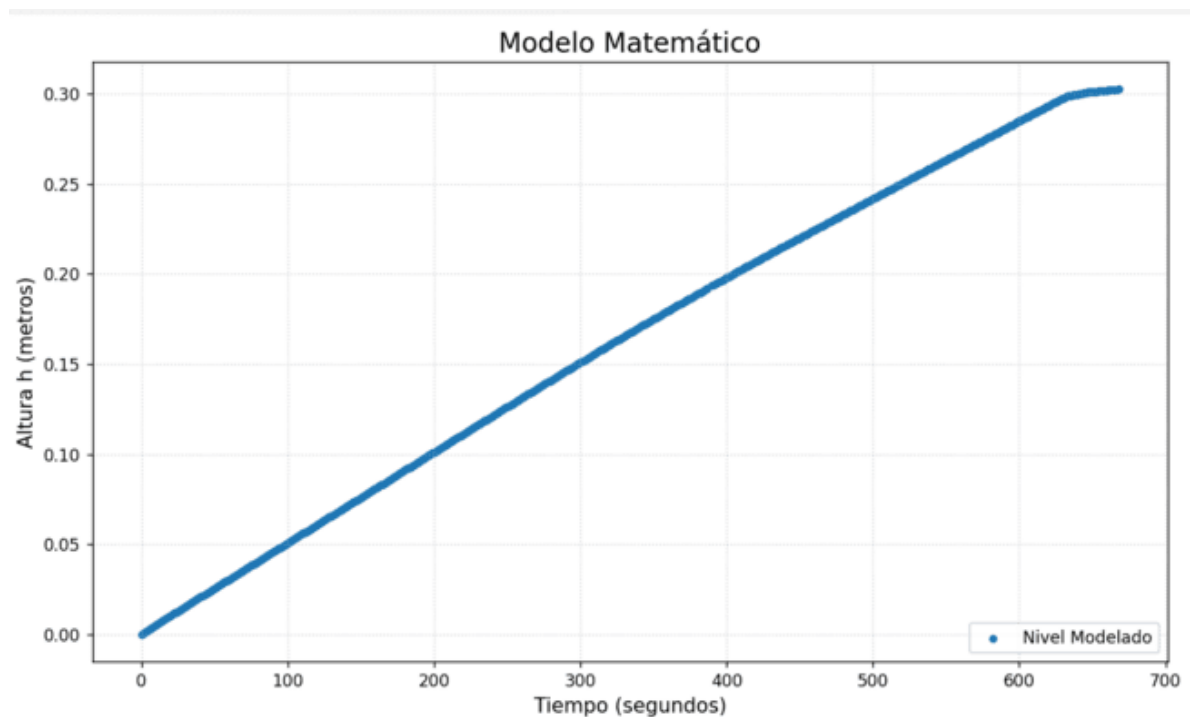
TERCERA MEDICIÓN			
PWM %	PWM (0-255)	Voltaje (V)	Caudal (Q)
70%	178.50	9.45	0.03
85%	216.75	10.40	0.05
100%	255.00	12.14	0.07

Nota: Se muestra el caudal y los voltajes obtenidos de las mediciones de Censado de la bomba en diferentes ciclos de trabajo PWM.

Tabla 15
Consolidado de datos

Ciclo de Trabajo (%)	Entrada X (PWM Digital)	Prueba 1 (Q)	Prueba 2 (Q)	Prueba 3 (Q)	Salida Yprom (Caudal Promedio)
70%	178.5	0.03	0.03	0.03	0.03
85%	216.75	0.05	0.05	0.05	0.05
100%	255	0.07	0.07	0.07	0.07

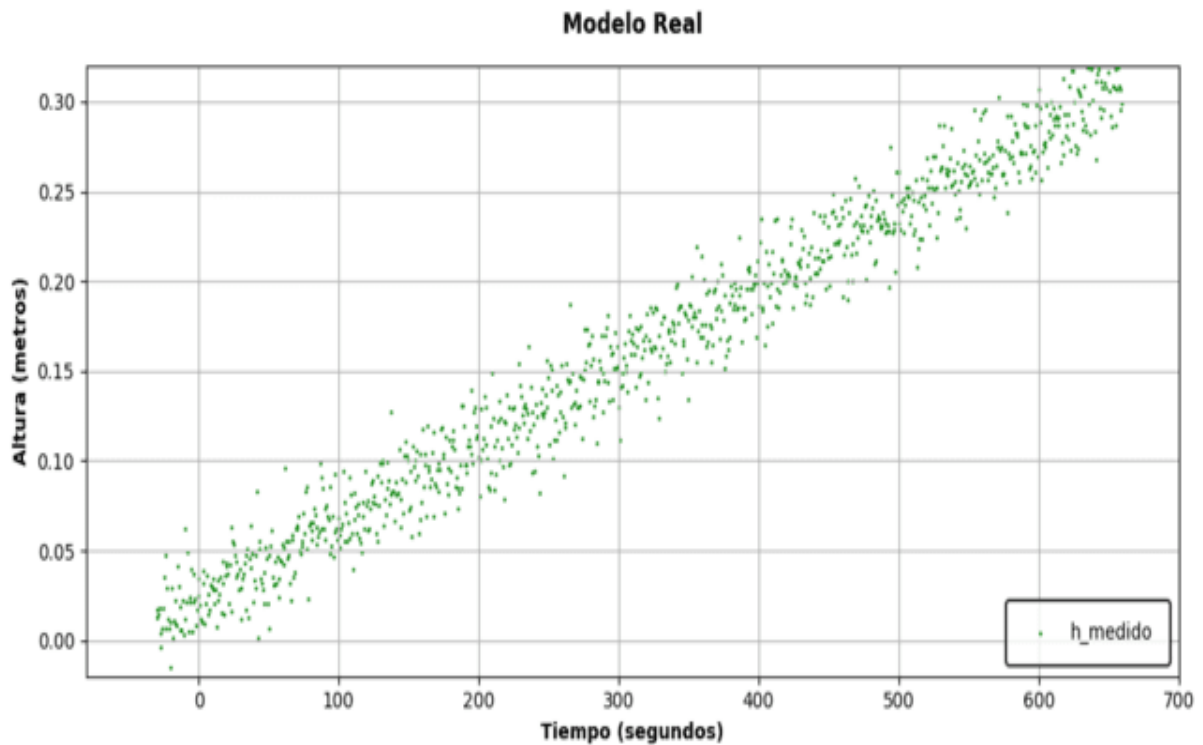
Figura 52
Modelo matemático de carga



Para este caso se observa sin duda que el modelo de carga usado para el modelamiento matemático de la carga al tanque elevado obedece a una recta de pendiente constante, a medida que aumenta el tiempo de censado, aumenta la altura, hasta alcanzar la altura del Setpoint, o altura objetivo que en este caso en 0.30 m. con un caudal constante de 0.07 L/s.

Tomando en consideración que no se hay perdidas menores, porque nuestro sistema es modular, quizás por ese lado este un poco y se distorsione la rectitud de la medición.

Figura 53
Medición real de carga



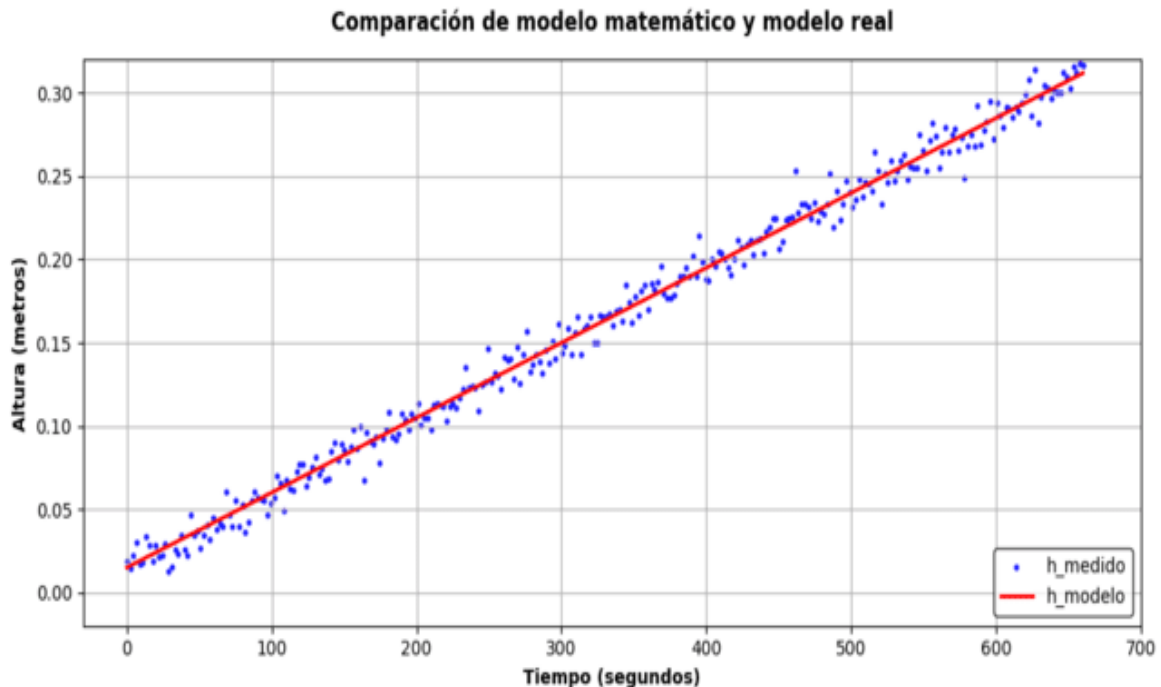
Las Figuras 52 y 53 contrastan la evolución temporal del nivel teórica frente a la real.

En la Figura 54 que se muestra a continuación, la superposición de ambas curvas evidencia que el proceso de carga se comporta como un sistema lineal ($dh/dt = \text{constante}$), validando el modelo de balance de masa para un caudal de entrada fijo. La dispersión observada en los datos reales (puntos azules) es mínima y atribuible al ruido natural del sensor ultrasónico, sin afectar la tendencia general de llenado, que alcanza el Setpoint de 30 cm en el tiempo de 663 segundos (11 minutos)

Comparación de modelo matemático con medición real

Figura 54

Comparación de modelos



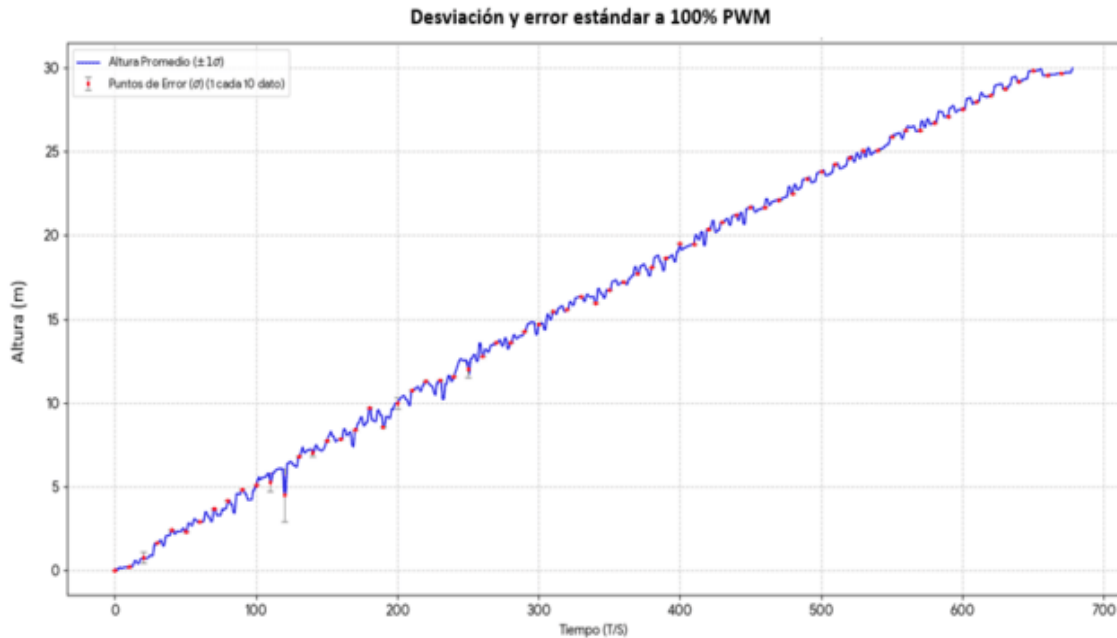
El modelo matemático aplicado para nuestro análisis se basó en el principio de la ecuación de conservación de masa, donde se ha tomado en cuenta las mediciones dadas a toda su potencia máxima de 12 voltios, comparando con un valor similar aplicado al modelo. Esta gráfica indica que el sistema físico real es similar que su modelo matemático actual. La gráfica muestra cómo evoluciona el Nivel de Agua en función del Tiempo, comparando el comportamiento ideal predicho por un modelo matemático con varias mediciones físicas (reales) del sistema: Modelo Matemático (Línea Sólida) representa el comportamiento ideal o teórico del sistema y muestra una relación lineal perfecta entre el tiempo y el nivel de agua. Según el modelo, el nivel de agua aumenta a una tasa constante (una pendiente fija).

Medición Real (puntos dispersos) representan los resultados reales, y el tiempo predicho por el modelo matemático se está muy cercano a los datos reales lo que significa que el modelo usado es el indicado

Desviación y error estándar de las mediciones al 100 % del PWM

Figura 55

Desviación y error al 100 %



Esta visualización muestra la imagen muestra una gráfica de dispersión y línea con barras de error que relaciona la Altura Promedio con el Tiempo. La gráfica muestra la evolución de la altura promedio a lo largo de un período de a 663 segundos.

- Línea Azul Oscuro: La Altura Promedio de las tres mediciones.
- Puntos de Error (Rojo y Gris):
 - El punto rojo es la Altura Promedio.
 - La línea vertical gris (la barra de error) representa la Desviación Estándar de las mediciones, indicando la dispersión.

Desviación y error estándar de las mediciones al 85 % del PWM

Figura 56

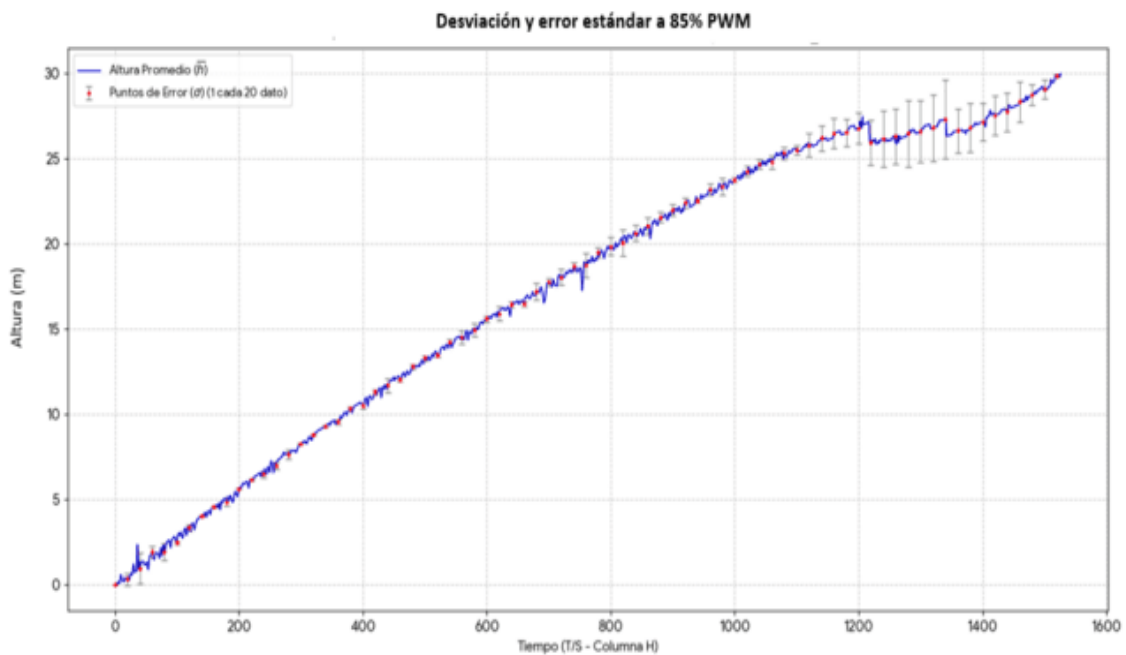
Desviación y error al 85 %



Desviación y error estándar de las mediciones al 70 % del PWM

Figura 57

Desviación y error al 70 %

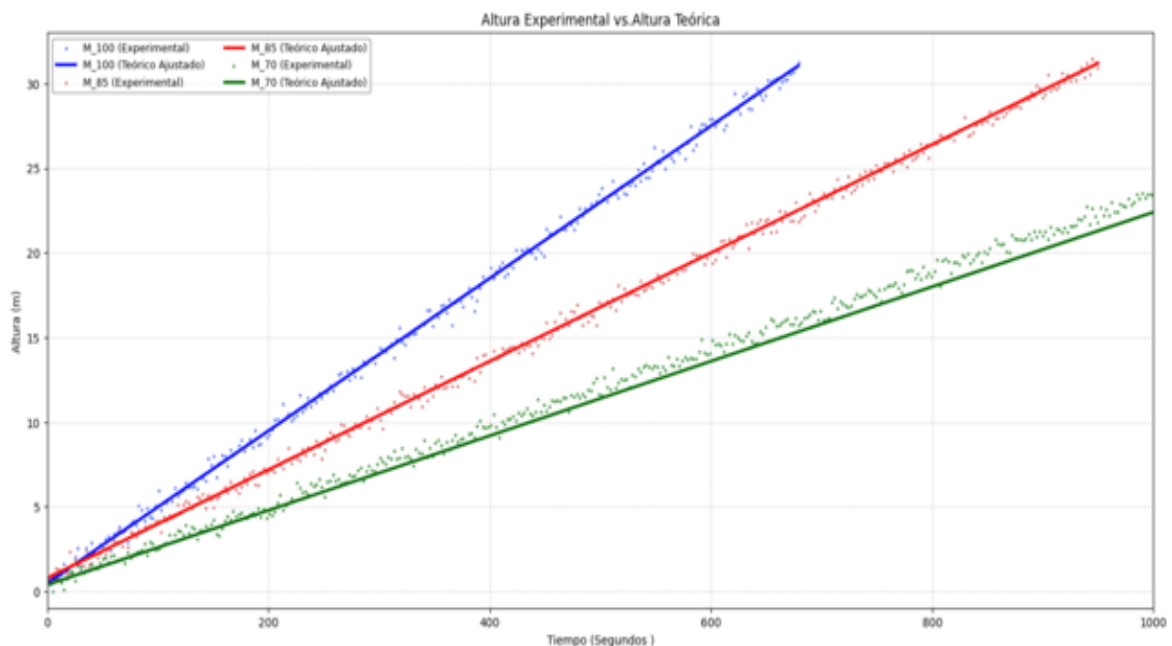


Las Figuras 55 al 57 se muestra la precisión del sistema bajo distintos regímenes de potencia. Se observa que la desviación estándar de las mediciones disminuye conforme se reduce la potencia de la bomba. Al 100% de PWM (Fig. 55), la turbulencia en la superficie del agua genera mayor ruido en la lectura del sensor ultrasónico; mientras que, al 70% (Fig. 57), el llenado es más lento, pero significativamente más estable, reduciendo el error en la lectura del nivel. Esto sugiere un compromiso de diseño entre la velocidad de respuesta y la estabilidad de la medición, para tomar en cuenta.

Comparaciones caudales y el modelo matemático tomando datos de PWM

Figura 58

Comparación Teórica y Experimental



Se hizo la comparación de la medición teórica versus la experimental en los diferentes caudales medidos con la finalidad de observar que tienen la misma tendencia de apertura

Los resultados del modelo de color verde constituyen una evidencia de que se trata de un modelo básico e idealizado. Al presentar una pendiente constante, este modelo no contempla variables críticas de la instalación física como la resistencia de las válvulas, las pérdidas

por fricción en los accesorios de PVC, ni las posibles fugas del sistema. La gráfica muestra una respuesta puramente teórica basada en la Ecuación de Continuidad, donde el incremento de altura es directamente proporcional al tiempo. Esta simplificación es intencional y cumple con el objetivo didáctico, ya que permite al estudiante identificar primero el comportamiento fundamental del sistema antes de enfrentarse a las perturbaciones y no linealidades propias de un proceso industrial real. El modelo ideal asume que el llenado comienza instantáneamente con cualquier señal de PWM. No obstante, como se determinó en el análisis de regresión, existe una zona muerta ($PWM < 106.4$). El modelo verde es una evidencia de que se ha diseñado una herramienta pedagógica simplificada, útil para enseñar los fundamentos antes de introducir la complejidad de las pérdidas de carga no lineales.

Mediciones realizadas experimentalmente para la descarga

Finalmente se ejecutó el modelo en la plataforma de Python, teniendo en cuenta el set point que se ha tomado en cuenta para todas las mediciones. Se hizo los datos de cm a cm, desde una altura 0.30 m, hasta descender al nivel de 0.00 m. (vaciado total)

A continuación, se observa los caudales promedio de las tres mediciones hechas para validar la confianza de las mismas.

Tabla 16

Caudales de salida promedio

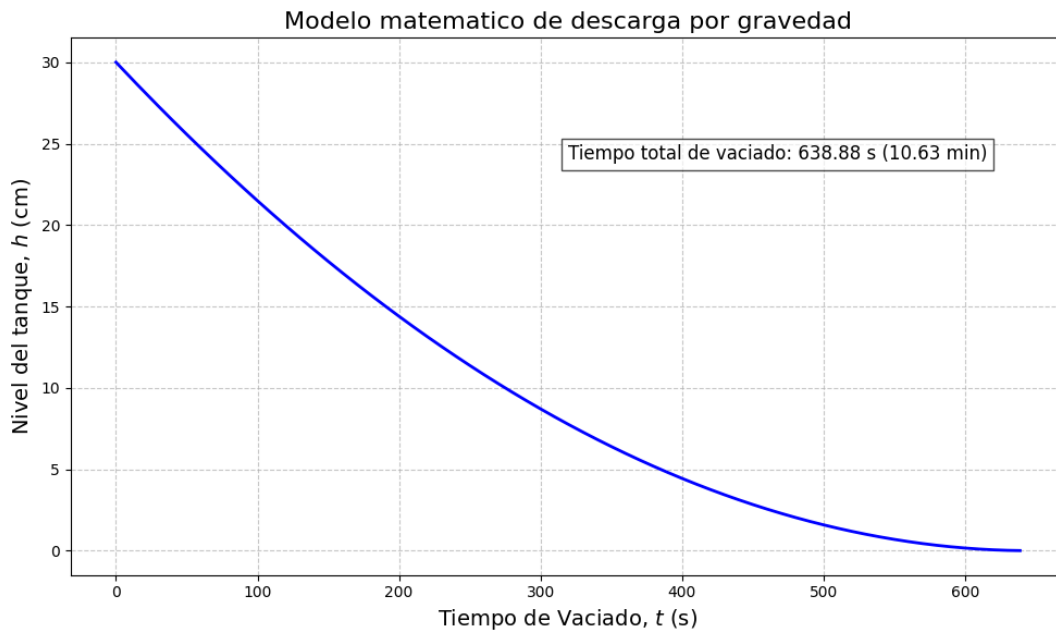
EXPERIMENTO	Qout
PRIMERA MEDICION	0.08008095
SEGUNDA MEDICION	0.0875857
TERCERA MEDCION	0.08814622

Tabla 17

Consolidado de datos de caudales de salida

Prueba 1 (Q)	Prueba 2 (Q)	Prueba 3 (Q)	(Q_out Promedio)
0.08008095	0.0875857	0.08814622	0.085271

Figura 59
Modelamiento matemático para la descarga



Se observó que para la descarga la ecuación modelada no muestra una línea recta en descenso abrupto, sino que más bien notamos que cuanto más cantidad de agua contiene el tanque elevado, vacía más rápido, y conforme va disminuyendo la altura, también va disminuyendo el caudal de modo que se cumple la ley de Torricelli, de descarga por gravedad. Que el caudal va disminuyendo conforme va disminuyendo el nivel del tanque.

Figura 60
Código para el modelamiento en descarga

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Carga de datos
df = pd.read_csv('VACIADO.xlsx - Hoja1.csv', skiprows=4, header=None)
data = df[[0, 3, 6, 9]].copy()
data.columns = ['Medicion_1', 'Medicion_2', 'Medicion_3', 'Sample']
data = data.apply(pd.to_numeric, errors='coerce').fillna(0)

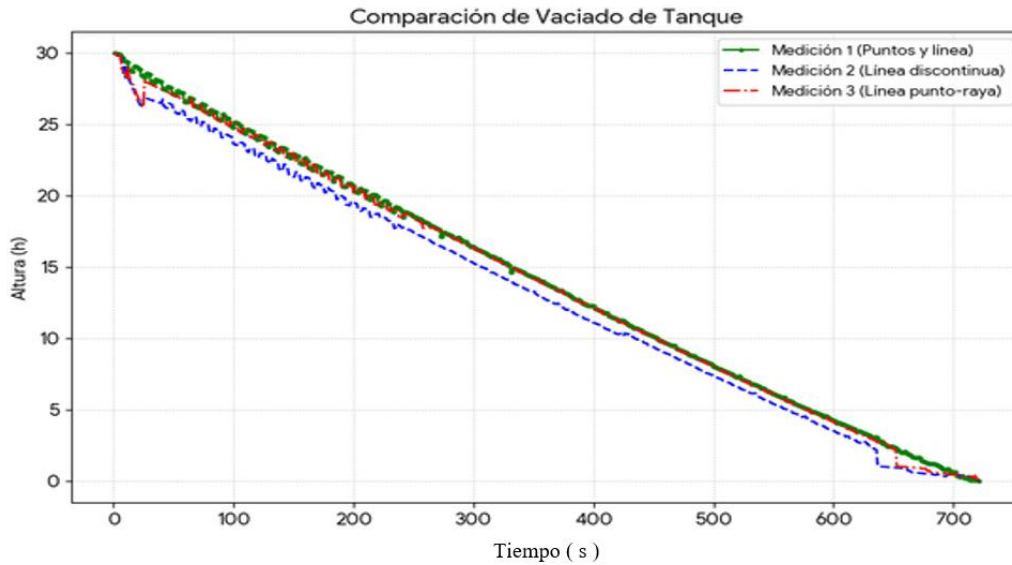
# Escala de tiempo (asumiendo dt = 0.1s según el archivo)
data['Time'] = data['Sample'] * 0.1

# Definición del modelo de Torricelli:  $h(t) = (\sqrt{h_0} - kt)^2$ 
def torricelli(t, h0, k):
    res = np.sqrt(h0) - k * t
    return np.where(res > 0, res**2, 0)

# Ajuste del modelo a los datos promedio
```


Medición real

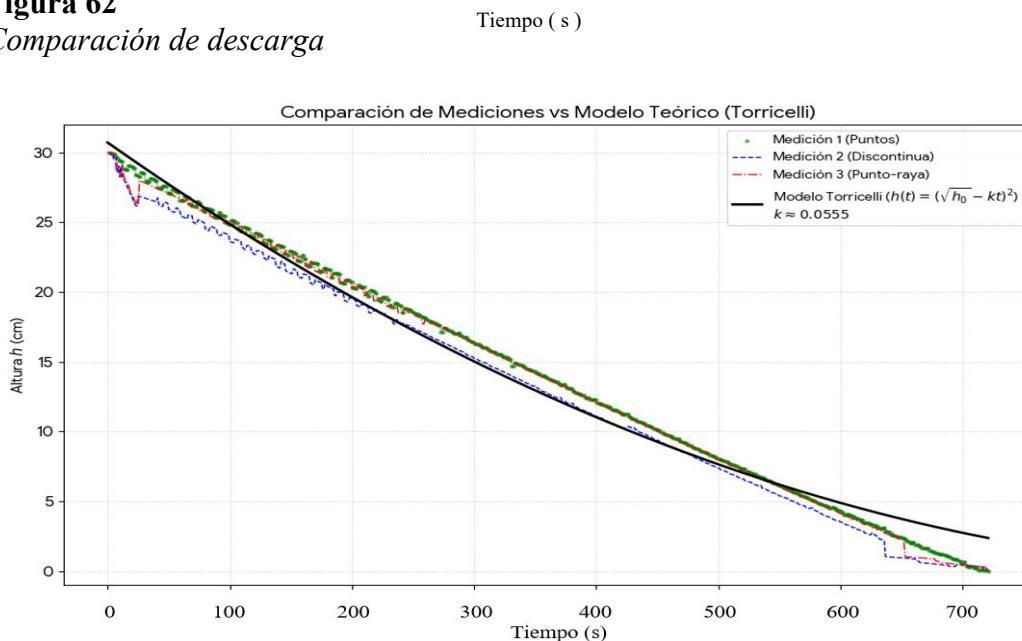
Figura 61
Medición real



Se presenta la evolución temporal del nivel durante la descarga real (puntos experimentales). A diferencia de la curva teórica esperada, los datos exhiben una tendencia lineal con una pendiente constante ($dh/dt \approx k$). Esto indica que el caudal de salida se mantiene prácticamente invariable durante todo el proceso de vaciado, independientemente de la altura de la columna de agua, lo cual sugiere que el sistema opera bajo un régimen de saturación hidráulica impuesto por la restricción de la válvula y no puramente por gravedad.

Comparación de modelo matemático con medición real

Figura 62
Comparación de descarga



Se contrasta el modelo matemático teórico de Torricelli (curva) frente a los datos experimentales (trazo lineal). Se observa una divergencia significativa entre ambos comportamientos: mientras el modelo teórico predice un vaciado rápido al inicio que se ralentiza al final (curva asintótica), el sistema real mantiene una velocidad de descarga constante. Esta comparación visual evidencia que el modelo de Torricelli idealizado no es suficiente para describir la dinámica de este prototipo específico debido a las pérdidas de carga dominantes en los accesorios, validando la necesidad de utilizar un modelo empírico lineal para el diseño del controlador.

Pruebas de Robustez (Cambio de Set Point):

Se hizo varias pruebas a diferentes Set point y notamos que el prototipo responde de manera rápida y eficaz. Para darle la indicación de cambio de set point a sistema, abrimos nuestra plataforma Arduino Ide donde tenemos el código de funcionamiento, le damos la siguiente instrucción:

Tabla 18

Set Point y variación de caudal

INSTRUCCIÓN	RESULTADO
S:15, 100	Set point de 15 cm a un caudal de 0.04 L/s
S:10, 85	Set point de 10 cm a un caudal de 0.06 L/s
S: 25, 70	Set point de 25 cm a un caudal de 0.09 L/s

Nota: instrucciones pueden ser asignadas de acuerdo a las necesidades del usuario.

Una vez ejecutada la instrucción dada el sistema empieza su funcionamiento hasta alcanzar su altura objetivo, mientras te va mostrando en simultaneo como se van comportando las variables en la pantalla HMI del módulo.

Respuesta del Control ON/OFF ante Cambios de Set Point (Robustez):

Se observó que el sistema responde de manera rápida y estable a cambios abruptos en el Set Point, demostrando que el hardware y la lógica de control implementada tienen una respuesta adecuada a perturbaciones en la referencia.

No olvidar que, para los casos de emergencia, en el supuesto caso que el sistema falle, existe la instrucción de parar el sistema en cualquier momento, ejecutando el comando “S”, que quiere decir Stop o parada

En el caso de que nuestro tanque está lleno y yo quiero tenerlo por ejemplo a 15 cm, sin necesidad de ejecutar la instrucción para el vaciado, se ejecuta la siguiente instrucción:

S, 15, 100

Esto permitirá que la electroválvula del desagüe se active automáticamente a modo ON y al detectar que se llegó al 15 cm de la instrucción dada, se cerrara (OFF)

Finalmente, para vaciar nuestro tanque y hacer nuevas mediciones se ejecuta el comando “VACIAR”, esta instrucción vaciara todo el líquido hasta el punto de referencia establecido por el sistema, en este caso es 0.00 cm.

De modo que queda demostrado que se puede interactuar con el sistema variar las alturas a pedido de los usuarios finales, y analizar cómo se comportan las variables a diferentes regímenes de trabajo del sistema y para realizar las comparaciones de los modelos teóricos tanto como carga y descarga, se tomaron más mediciones y en diferentes situaciones

- **Modelo Matemático:** Presenta una curva cóncava (la pendiente se hace menos negativa a medida que el tiempo avanza). La altura desciende a cero en aproximadamente 10.63 minutos.
- **Medición Real:** Presenta una forma mucho más lineal que la teórica. La descarga tarda significativamente más, llegando a cero en 11.05 minutos.

El comportamiento de la descarga de un tanque bajo la acción de la gravedad, con flujo a través de un orificio o tubería en la base, se rige típicamente por el modelo de Torricelli (Teórico) que asume un flujo turbulento donde la velocidad de salida (V_{out}) es proporcional a $\sqrt{2gh}$ (donde h es la altura). Esto lleva a una ecuación diferencial no lineal donde la tasa de

vaciado (dh/dt) es proporcional a $-\sqrt{h}$. Esta relación produce la curva cóncava no lineal observada en la línea roja, donde el caudal es máximo al inicio y se reduce a medida que la altura disminuye.

Notamos que la medición Real (Experimental), línea azul, es casi lineal, especialmente en el rango superior. Esto implica que la tasa de vaciado (dh/dt) se mantuvo casi constante y esto ocurre solo si el Caudal de Salida (Q_{out}) es constante.

La marcada diferencia entre el modelo y la realidad sugiere que el sistema experimental no está dominado por la gravedad (Torricelli), sino por otros elementos que fuerzan un caudal constante que existe una válvula de diámetro pequeño inmediatamente después del punto de descarga que actúa como el principal limitador del caudal. Esta restricción opera en un régimen de alta pérdida de carga que desvincula el caudal de salida de la presión hidrostática (h) forzando un caudal constante. Con ello se demuestra una discrepancia significativa entre el modelo matemático simple de descarga por gravedad (Torricelli) y la realidad experimental. La curva de descarga real es predominantemente lineal, lo que invalida el modelo no lineal y sugiere que el proceso de descarga está limitado y controlado por un elemento externo (válvula) que fuerza un caudal volumétrico constante ($Q_{out} = \text{constante}$) independientemente de la altura hidrostática. Para que el Modelo Matemático sea predictivo, debe ser reformulado como un modelo lineal de primer orden con un caudal de salida constante, ajustando el valor de Q_{out} para reflejar la duración real de 11 minutos.

La Curva de Carga (Llenado)

El proceso de Carga (azul discontinuo) se modeló asumiendo un Caudal de Entrada Constante (Q_{in}) 0.09 L/segundo, La dinámica del Modelo Matemático es $(dN/dt) = Q_{in}/A_{tanque}$. La curva es una línea recta (lineal). La velocidad de llenado es constante porque el caudal que entra al tanque es fijo. El Nivel del Tanque aumenta uniformemente con el tiempo

La Curva de Descarga (Vaciado)

El proceso de Descarga (roja continua) se modeló utilizando el Principio de Torricelli y la Ecuación de Continuidad.

La dinámica del Modelo Matemático es $Q_{out} = A_{tanque}(dN/dt)$. La curva es no lineal (decae siguiendo una curva de raíz cuadrada).

El caudal de salida es máximo cuando el Nivel del Tanque es mayor (mayor presión hidrostática). Por lo tanto, el tanque se vacía rápidamente al inicio y el proceso se ralentiza a medida que el Nivel desciende hacia 0.0 cm.

El punto donde las curvas se cruzan ocurre exactamente a la mitad del tiempo total y corresponde al 50% del Nivel máximo del tanque. Este punto de coincidencia es resultado de haber igualado el tiempo total para ambos procesos. La gran diferencia entre las dos curvas (la línea recta vs. la curva) ilustra la principal conclusión del modelo: la gravedad genera una dinámica de flujo variable y no lineal en la descarga, mientras que un flujo de entrada controlado por la bomba genera una dinámica constante y lineal en la carga.

IV. DISCUSIÓN

4.1. Análisis Crítico del Modelamiento Matemático y la Respuesta Dinámica

El diseño se basó en el modelamiento del tanque como un sistema de primer orden, pero el análisis experimental del caudal de descarga (Figura 52) reveló una discrepancia significativa que constituye el principal hallazgo ingenieril del prototipo. El modelo teórico de Torricelli predice correctamente una dinámica no lineal (vaciado más rápido al inicio, línea roja discontinua), ya que la velocidad de flujo es proporcional a la raíz cuadrada de la altura. Cuantificada: El tiempo de asentamiento (T_s) y superó el valor predicho teóricamente. Sin embargo, la medición real de la descarga exhibe un comportamiento más lineal. Esto invalida la aplicabilidad del modelo de Torricelli. Esto sugiere fuertemente que el caudal de salida (Q_{out}) no está dominado por la altura hidrostática, sino que está limitado por un elemento restrictivo (válvula) que opera en un régimen de alta pérdida de carga.

Este elemento fuerza un caudal volumétrico de salida casi constante (régimen de flujo laminar o totalmente turbulento con pérdidas dominantes).

Sin embargo, la medición real de la descarga exhibe un comportamiento lineal que difiere de la raíz cuadrada predicha por Torricelli. Si bien este fenómeno podría explicarse mediante un análisis exhaustivo de la mecánica de fluidos dentro de la válvula (cambios en el número de Reynolds o coeficientes de fricción variables en régimen transitorio), dicho estudio fenomenológico y micro hidráulico excede el alcance y el marco de este proyecto, cuyo objetivo central es la implementación de estrategias de control y modelamiento matemático y no la caracterización hidráulica pura.

Para los fines de esta tesis, es suficiente constatar empíricamente que el módulo se comporta como un sistema lineal. Esta simplificación basada en los datos observados (System Identification) es válida y pragmática, ya que permite diseñar el lazo de control asumiendo una

ganancia constante, cumpliendo así con los objetivos sin necesidad de profundizar en las complejidades hidrodinámicas que están fuera de la delimitación del estudio.

- Esta diferencia se atribuye principalmente a la simplificación del modelo. La dinámica real incluye no linealidades no modeladas, tales como la inercia del motor de la bomba al recibir la señal PWM, las pérdidas de carga por accesorios (válvulas y codos) que se comportan de manera distinta a la predicha por la Ecuación de Darcy-Weisbach en regímenes transitorios, y el ruido e inexactitud inherente al sensor ultrasónico HC-SR04 en ciertas condiciones de operación.
- A pesar de la desviación, el modelo de primer orden se ratifica como una herramienta didácticamente efectiva, ya que simula con suficiente precisión la dinámica fundamental del proceso, permitiendo a los estudiantes la calibración inicial de controladores, tal como lo sostienen Vergara, Molina y Manchado (2011) en el contexto de prototipos de laboratorio.

4.2. Evaluación del Desempeño del Control y la Metodología Didáctica

- El prototipo implementó un control de tipo ON/OFF para la validación funcional. El modelo de carga sin descarga predice una dinámica lineal, la cual fue validada conceptualmente por las mediciones reales (Figura 54). La caracterización de la bomba mediante la Modulación por Ancho de Pulso (PWM) se modeló con éxito a través de la regresión lineal ($R^2=0.9838$) Este modelo permitió identificar la **Zona Muerta** (PWM mínimo de arranque ≈ 106.4), un parámetro fundamental para cualquier estrategia de control automático avanzada.
- Este resultado confirma la funcionalidad básica del prototipo (respuesta al OE4), pero subraya la principal limitación del control de dos posiciones: la falta de precisión en estado estacionario (Wang, Liu, & López, 2019).

- La oscilación no es una falla, sino un fenómeno de enseñanza. Permite a los estudiantes observar de forma clara la dinámica no lineal y comprender la necesidad de migrar a controladores proporcionales o PID para eliminar el error en estado estacionario, contrastando la robustez de un control simple con la exigencia de precisión industrial.

4.3. Comparación con Antecedentes y Contribución al Conocimiento

La principal contribución de la tesis radica en la elección metodológica de implementar el sistema utilizando hardware Open Source. El prototipo se validó con control ON/OFF en lazo cerrado, demostrando su capacidad para responder rápidamente a los cambios de Set Point.

- El trabajo de Avendaño & Cabarcas (2017) resultó ser muy valioso en las etapas iniciales, pues su propuesta de un sistema distribuidor de agua con dos tanques interconectados, controlado mediante Arduino y supervisado a través de una interfaz SCADA desarrollada en LabVIEW, ofreció un referente técnico concreto sobre la viabilidad de integrar sensores ultrasónicos para la medición de nivel con plataformas de bajo costo. La metodología de calibración descrita por estos autores, así como sus resultados satisfactorios en el control de llenado, brindaron una base de confianza para adoptar un enfoque similar en el presente prototipo, particularmente en lo que respecta al uso del sensor ultrasónico JSN-SR04T y al diseño de la interfaz de visualización HMI.
- Por su parte, Andy & Guanoluisa (2021) aportaron una perspectiva pedagógica que resultó determinante para estructurar la propuesta didáctica del presente trabajo. Su módulo experimental, orientado al aprendizaje progresivo desde el control manual hasta el uso de PLCs y variadores de frecuencia, evidenció que el diseño modular facilita la comprensión escalonada de los sistemas de control industrial. Esta experiencia influyó directamente en la decisión de incorporar en el prototipo tanto el modo de operación manual como el automático, permitiendo al estudiante transitar de manera gradual entre ambos niveles de complejidad y desarrollar competencias prácticas de forma efectiva.

- En una línea similar, Benítez (2023) demostró que la medición de nivel mediante sensores de presión diferencial representa una alternativa técnicamente sólida y pedagógicamente rica, al exponer al estudiante a un principio de medición distinto al ultrasónico. Esta referencia motivó la incorporación del sensor de presión en el presente sistema como instrumento complementario, enriqueciendo así la experiencia de aprendizaje y acercando el prototipo a las condiciones de operación reales. Además, la arquitectura de supervisión mediante interfaz gráfica descrita por este autor reforzó la decisión de implementar una pantalla HMI para el monitoreo en tiempo real de las variables del proceso.
- Los estudios de Ruíz (2019) y Nolasco (2019), aunque de naturaleza más general, contribuyeron a consolidar la justificación del proyecto al coincidir en que los módulos didácticos que integran sensores, actuadores e interfaces de control constituyen herramientas eficaces para fortalecer el aprendizaje en automatización industrial. Sus conclusiones respaldaron el enfoque metodológico adoptado y confirmaron que este tipo de formación práctica resulta indispensable para preparar profesionales capaces de responder a las exigencias de un mercado laboral cada vez más orientado hacia la digitalización y la automatización de procesos.
- Finalmente, el trabajo de Coronado (2024), desarrollado en el contexto nacional, fue significativo por una razón particular: más allá de sus logros técnicos con el controlador Siemens SIMATIC S7-1200, su experiencia puso de manifiesto las limitaciones económicas que enfrentan instituciones como la Universidad Nacional de Jaén para acceder a equipos industriales de alta gama. Esta realidad, lejos de desalentar la investigación, orientó la búsqueda hacia una solución tecnológicamente funcional pero económicamente accesible, sustentada en plataformas de hardware abierto como Arduino, lo que constituye precisamente uno de los aportes diferenciadores del presente prototipo frente a los antecedentes revisados.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La implementación del prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido cumplió satisfactoriamente con el objetivo general de la investigación, al poner a disposición de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén una herramienta experimental funcional, de bajo costo y alto valor pedagógico. El prototipo demostró ser capaz de simular escenarios representativos de control, permitiendo que los estudiantes validen empíricamente principios de mecánica de fluidos, instrumentación y control automático que anteriormente solo podían abordarse desde una perspectiva teórica o simulada. Con ello, se contribuye concretamente a cerrar la brecha formativa identificada en la institución y a fortalecer el perfil profesional de sus egresados.

- El análisis teórico del sistema permitió establecer que el comportamiento del nivel de líquido responde a un modelo de primer orden, lo cual facilitó la definición de los requerimientos técnicos del prototipo. Se comprobó que, si bien la dinámica de descarga sigue el modelo no lineal de Torricelli, la linealización del caudal en torno al punto de operación constituye una simplificación válida y pedagógicamente adecuada para entornos educativos. Un hallazgo relevante fue la identificación de una zona muerta en la bomba centrífuga, que exige un ciclo de trabajo mínimo del 41% de la potencia nominal (equivalente a un valor PWM superior a 106) para garantizar el inicio del flujo. Este resultado es determinante para establecer los límites operativos del sistema y definir los parámetros de compensación por software requeridos en estrategias de control más avanzadas.
- El diseño del módulo logró integrar de manera coherente una estructura mecánica funcional con un sistema de control electrónico dual. La caracterización experimental de la bomba permitió obtener la ecuación de caudal $Q = 0.0164(\text{PWM}) - 1.7447$, la cual

describe con precisión el comportamiento del actuador principal dentro del rango de operación definido. Asimismo, la implementación de la comunicación serial RS485-TTL entre el Arduino Uno R3 y el Arduino Pro Mini garantizó una gestión eficiente de la interfaz HMI, asegurando la integridad y coherencia de los datos durante el monitoreo simultáneo de las variables de flujo y nivel.

- La etapa de fabricación y ensamble del prototipo demostró que es técnicamente viable construir módulos didácticos de calidad bajo una filosofía de bajo costo y componentes accesibles. El proceso de fabricación de la PCB, el ensamble de los subsistemas hidráulico, electrónico y de instrumentación, y la programación de los sistemas embebidos resultaron en una plataforma funcional que representa un ahorro significativo frente a las soluciones comerciales equivalentes. Este resultado confirma que la Universidad Nacional de Jaén puede dotarse de herramientas de laboratorio de alto valor académico optimizando sus recursos presupuestarios institucionales.
- La evaluación experimental bajo control ON/OFF en lazo cerrado validó la robustez del sistema ante variaciones en el Set Point, manteniendo el nivel de líquido dentro de una banda de histéresis de ± 1 cm. Se constató además que la estabilidad del caudal presenta una relación inversamente proporcional con la velocidad de llenado: al reducir la potencia suministrada a la bomba del 100% al 70%, el sistema exhibe menor variabilidad en el caudal, aunque a costa de un mayor tiempo de respuesta. Estos resultados evidencian que el prototipo replica fielmente fenómenos presentes en sistemas reales, tales como el ruido por turbulencia, la histéresis del actuador y la divergencia entre los modelos teóricos y el comportamiento físico del sistema.

5.2. Recomendaciones

Con base en la experiencia de implementación y los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuras para mejorar la utilidad académica y técnica del prototipo:

- Se recomienda utilizar los datos de la curva de Respuesta al Escalón a Lazo Abierto (Capítulo 3) para sintonizar e implementar un Controlador PID en el firmware del Arduino. Esto permitirá a los estudiantes realizar prácticas de sintonización (ej. con el método de Ziegler-Nichols) y comparar la mejora en la precisión y la eliminación de la oscilación frente al control ON/OFF.
- Se sugiere desarrollar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) basada en software libre (ej. Python/Matplotlib o Processing) conectada al puerto serie. Esto optimizaría la adquisición de datos en tiempo real, facilitaría la visualización de las gráficas de respuesta transitoria y permitiría una exportación de datos más sencilla y robusta para los informes de laboratorio.
- Se recomienda evaluar la integración de un motor paso a paso (servomotor) para la válvula de descarga o un sistema de caudalímetro para un control de flujo más fino, ya que ha sido muy complicado lograr que el agua se abra automáticamente con una electroválvula de alta presión, ni tampoco con una de baja presión, así como la comparación del rendimiento del sensor ultrasónico con sensores capacitivos o de presión para determinar el sensor de menor error en estado estacionario.
- Además, se sugiere explorar la Fusión Sensorial combinando la medición del sensor ultrasónico de nivel con la medición del sensor de presión HK3022 (Presión Hidrostática). Esto permitirá una medición más robusta, donde el sensor de presión compense el ruido del sensor ultrasónico a bajo nivel, proporcionando una lectura de altura más estable y precisa para la sintonización de futuros controladores PID.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andy, J., & Guanoluisa, E. (2021). *Diseño e implementación de un módulo experimental para simular procesos de control industrial, en el laboratorio de la carrera de ingeniería eléctrica en sistemas eléctricos de potencia de la Universidad Técnica de Cotopaxi Campus La Matriz en el periodo*. [Tesis]. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Arce, N. (2020). *Estabilidad del nivel del agua en un tanque con variaciones generadas por la demanda del servicio mediante modelos matemáticos*. In Editorial Académica (Ed.), *Revista Científica Pakamuros* (Vol. 8, Issue 4). Universidad Nacional de Jaen. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v8i4.152>
- Arce, N., Piedra, J., Escobar, E., Lujan, E., Aguilar, L., & Gutierrez, F. (2021). *Application of Mathematical Models to Estimate the Water Level Stability in a Two-Tank System in Series with Service Demand Variations*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86653-2_35
- Arevalo, N. & Chango, D. (2024). *Diseño y Construcción un Módulo Didáctico Entrenamiento de Instalaciones de Distribución Doméstica de Agua para la carrera de TSE en la ULEAM*. [Tesis]. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
- Avendaño, A., & Cabarcas, L. (2017). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para controlar el nivel de un líquido en dos tanques, en el laboratorio de procesamiento de señales de la universidad del Magdalena*. [Tesis]. Universidad del Magdalena.
- Bazán, O. (2023). *Diseño de un módulo de entrenamiento PLC para la mejora del aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Electrónica – UNJFSC, Huacho 2023*. [Tesis]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Benítez, J., & Hernández, R. (2023). *Actualización tecnológica y puesta en servicio del banco de entrenamiento del PLC SIEMENS S7-200 del laboratorio de automatización de la Universidad Antonio Nariño en Cartagena*. Universidad Antonio Nariño.
- Chicaiza, W. (2025). *Desarrollo de módulos didácticos para la enseñanza de sistemas de control, electrónica básica y energías renovables diseño e implementación de un módulo didáctico de control de flujo*. Escuela Politécnica Nacional.
- Chimbo, J., & Shigui, R. (2023). *Implementación de un módulo para la automatización de procesos industriales para el laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná*.
- Choto, A. I., & Guanotasig, E. O. (2024). *Análisis comparativo del controlador I-PD versus controladores clásicos* (Tesis Doctoral), Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi:(UTC).

- Coronado, F. (2024). *Diseño de un módulo didáctico de control de caudal y nivel como soporte educativo para las materias de control y automatización industrial en la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo*. Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo.”
- Dorf, R., & Bishop, R. (2022). *Modern Control Systems* (Pearson, Ed.; 14th ed.).
- Escaño, J. M. & Maestre, J. M. (2018). *Sistemas de medida y regulación*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Felder, R., & Rousseau, R. (2005). *Elementary principles of chemical processes* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Franklin, G., Powell, J., & Workman, M. (2020). *Digital Control of Dynamic Systems* (Third Edition).
- Gadvay, E., Lapo, B., & Jara, M. (2024). Prototipo experimental como recurso didáctico para la comprensión y aplicación de los principios de la hidrostática. *Revista Social Fronteriza*, 4(6).
- Guevara, J., Ramírez, R., Elías, L., & Meléndez, C. (2023). Diseño matemático y modelado de componentes de control de proceso de flujo y nivel FPC para integrar un simulador virtual con realidad aumentada y control a distancia por teleingeniería. *Revista Tecnológica*.
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Herrera Abad, J. M., Huiman Sandoval, J. A., Vales Carrillo, J. A., & Flores, E. (2023). Sistema de Modulo Didáctico para el Control del Proceso de Llenado de Recipientes Mediante PLC. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(5), 1929–1944. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.7853
- Hoyos, J., Cardona, J., Muñoz, P., & Ramirez, D. (2023). Una Revisión Sistemática a las Aplicaciones en Prototipado Rápido para Control. *Revista Iberoamericana de Tecnologías Del Aprendizaje*, 18(1), 76–85. <https://doi.org/10.1109/RITA.2023.3250559>
- Lafuente, C., & Marín, A. (2008). *Metodologías de la investigación en las ciencias sociales: Fases, fuentes y selección de técnicas*. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (64), 5–18.
- Londoño, R. (2015). *Balances de masa y energía*. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <https://ia801304.us.archive.org/15/items/LIBROBME20151/LIBRO-BME2015-1.pdf>
- Martínez, G. P., & Ochoa, A. C. (2023). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel y caudal en dos tanques para el Laboratorio de Automatización e*

3

Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Trabajo de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE).

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (Pearson, Ed.; Sexta edición).

Nise, N. (2019). *Control Systems Engineering* (Wiley, Ed.; Eighth Edition).

Nolasco, L. (2019). *Diseño de un módulo didáctico de simulación de procesos industriales usando PLC S7-1200 y HMI KTP 700 Basis. Para el laboratorio de automatización y control, de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur- Untels.* In *Molecules* (Vol. 9, Issue 1)://dx.doi.org/10.1155/2015/420723%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76

Ramírez, J. M. (2025). *Educación en ingeniería de control: Método didáctico del aprendizaje basado en proyectos.* Universidad del Valle. DOI: 10.25100/peu.5072022

Recalde, W., & Toaquiza, O. (2024). *Implementación de un módulo didáctico para la asignatura de automatización de la carrera de electromecánica de la UTC Extensión La Maná.*

9

Ruíz, J. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo de modulo didáctico de caudal para medir su influencia en el aprendizaje de la instrumentación y control industrial.* Universidad Tecnológica del Perú.

Seborg, D., Mellichamp, D., Edgar, T., & Doyle, F. (2023). *Process Dynamics and Control* (Wiley, Ed.; 4th Edition).

Tinoco, Y., & Vaca, C. (2024). *Implementación de un módulo didáctico para la asignatura de sistemas de control oleoneumático en la UTC Extensión La Maná.* [Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión la Maná]. In *Repositorio Uta.* <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6265>

Torres, J., & Chanoluisa, S. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el laboratorio de automatización industrial.* Universidad Politécnica Salesiana.

3

Vaca, R., & Castro, F. (2010). *Diseño e implementación de un módulo didáctico de monitoreo y control del nivel de agua basado en un computador, a través del PLC utilizando LABVIEW para el laboratorio de control.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Vergara, J., Molina, R., & Machado, C. (2011). *Prototipo para control automático de nivel y caudal de líquidos.* *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 9–11. <http://www.re-dalyc.org/articulo.oa?id=505554810003>

DEDICATORIA

A mis padres, pilares fundamentales de mi vida.

A mi madre, **María**, por su amor inquebrantable, su fortaleza y su fe en mí y en cada paso que doy, gracias por tus oraciones.

A la memoria de mi padre, **Víctor**, que ya no está físicamente a mi lado, pero su recuerdo es la fuerza para seguir a delante siempre estarás en mi mente y mi corazón.

A mis hermanos, **Evelin, Víctor y Zulema**, por su apoyo constante y complicidad.

A mis sobrinos, **Jeampier, Tatiana, Fabián y Farid**, espero que este logro les sirva como un recordatorio de que con dedicación cualquier meta es posibles, futuros soñadores y la razón para dejar un legado.

A mi mejor amiga **Lizbeth**, por tu apoyo incondicional en todo momento y tus buenos deseos y ser parte de este logro, gracias por tu ayuda.

A mi pareja por ser la persona que siempre me está apoyando en cada paso que doy, y ser parte importante de mi proceso.

Dahana Milagros Paiva García

A mi amada esposa, Milagritos Elizabeth

Por ser una pieza clave de mi vida, por su soporte incondicional y tu infinita constancia, que me permitió concentrarme en mis estudios y alcanzar esta meta. Gracias por esa alegría diaria, que me motiva a emprender nuevos caminos.

A mi querida hija, Amaia Rosceli

Mi mayor inspiración y la razón más hermosa para buscar la excelencia. Este logro es también tuyo, un testimonio del futuro que me esfuerzo por construir para ti.

A mis queridos padres, Segundo y Celinda

Por su ejemplo de esfuerzo, perseverancia y amor incondicional. Por brindarme siempre su apoyo, confianza y por enseñarme que los sueños se alcanzan con dedicación y trabajo constante. Este logro es la prueba de su invaluable sacrificio.

Hilder Olivera Díaz

AGRADECIMIENTO

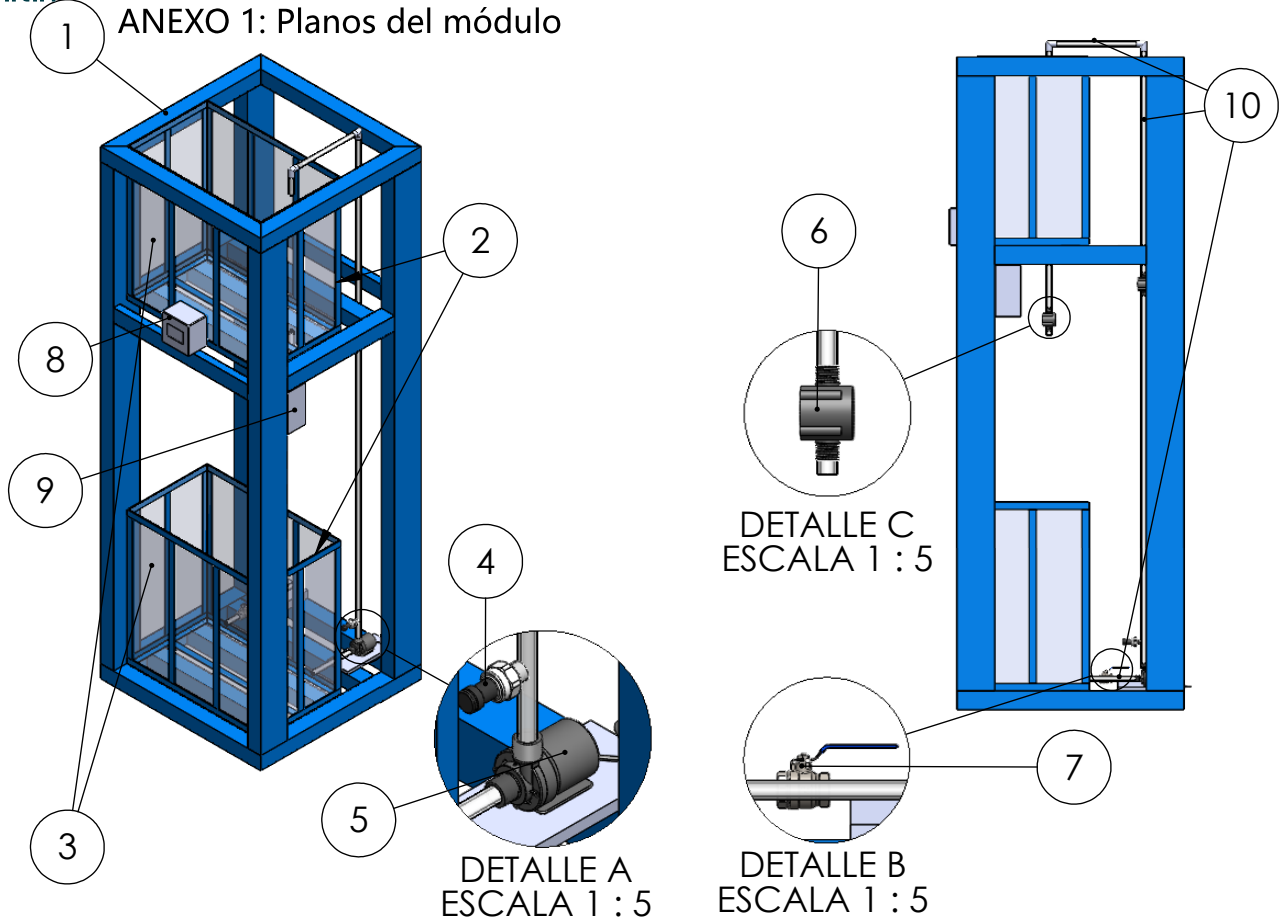
Agradecemos a Dios por su amor infinito y por siempre cuidarnos y ser nuestra guía en cada paso que damos, y permitir este logro.

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a las personas e institución que, con su valioso apoyo, contribuyen a la realización de este proyecto.

En primer lugar, al **Mg. Oswaldo Pinedo Nava**, nuestro asesor gran investigador de renombre nacional e internacional, por su guía contante, apoyo y dedicación que ha sido esencial en nuestro desarrollo académico y personal, nuestra profunda gratitud y admiración por ser parte de este logro.

Asimismo, agradecemos al Instituto de Investigación de Energías Renovables (INRER), y a sus dependencias adscritas “Laboratorio de Diseño Mecánico, Fabricación y Manufactura (DFABLAB)” (RES. CCO. N° 200-2025-CCO-UNJ), y el “Laboratorio de Medición de Recursos Energéticos Renovables, Calidad y Eficiencia Eléctrica (MEDRER)” (RES . P. N° 444-2023-CO-UNJ), por brindar el apoyo técnico y científico necesario para la ejecución de esta investigación, así como por promover la formación y el impulso de nuevas propuestas en beneficio del desarrollo de módulos didácticos educativos

ANEXO 1: Planos del módulo



Nº DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Plataforma de prototipo	1
2	Tanque	2
3	Acrílico	2
5	Bomba de agua 12VDC	1
6	Sensor de flujo	2
7	Valvula de esfera con palanca 1/2in	1
4	Sensor de presión	1
8	Caja termica 10x10x7cm - electronica	1
9	Caja termica 30x30x7cm - electronica	1
10	Tubo de PVC de 1/2in	1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA

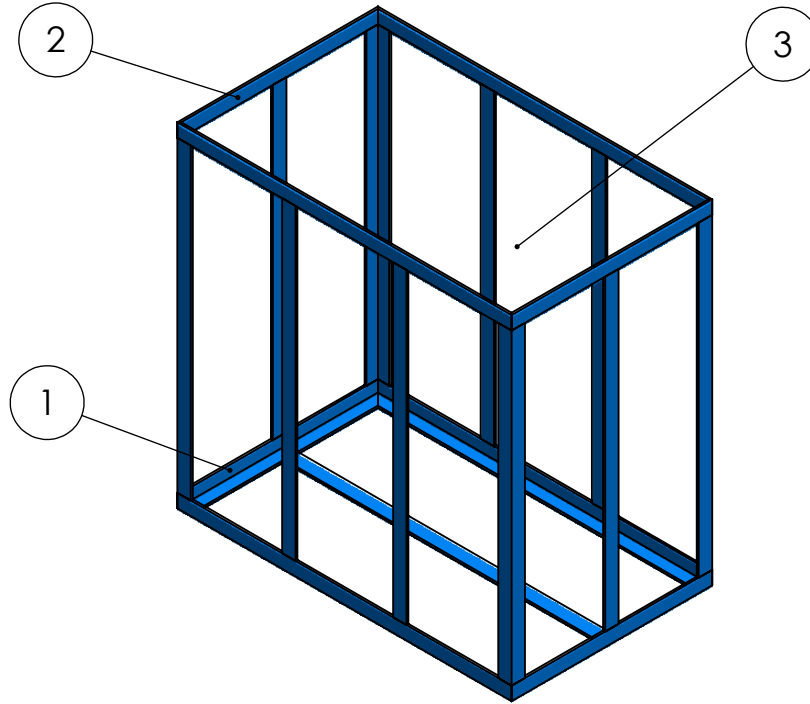


AUTORES:
Dahana Milagros Paiva García
Hilder Olivera Díaz

PROYECTO: Implementación de un prototipo didáctico
de control de flujo y nivel de líquido, para la
universidad nacional de Jaén

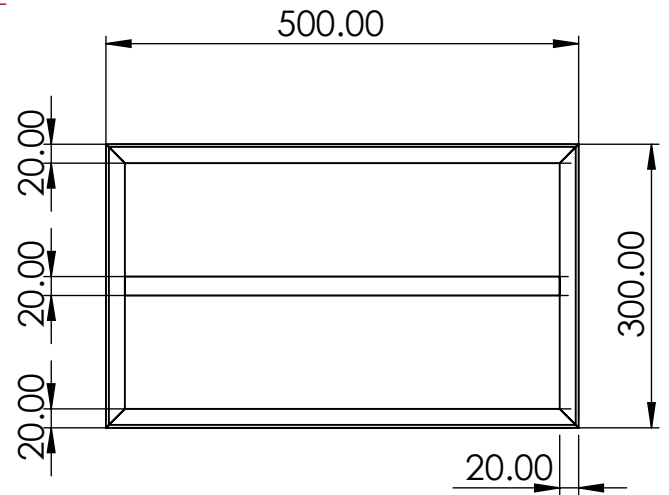
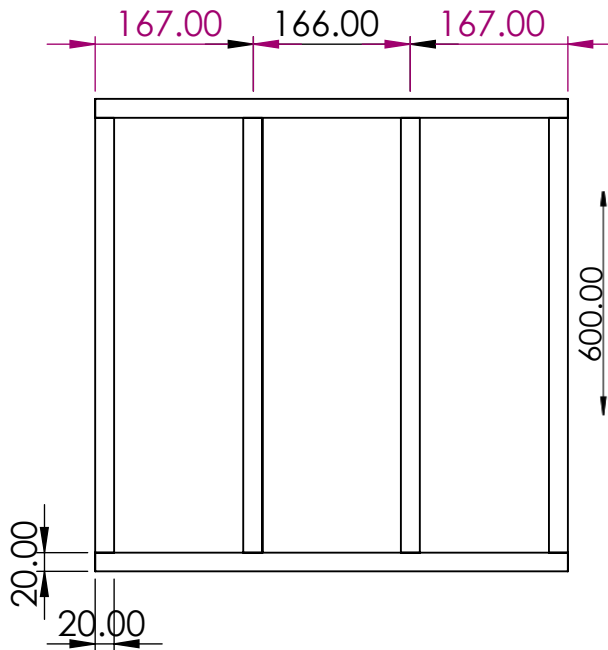
FECHA: 01/12/2025

ESCALA: 1:20



VISTA POSTERIOR

VISTA SUPERIOR



ITEM	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Base del tanque	Platina de acero 3/4" × 1/8"	2
2	Soportes verticales	Perfil angular de acero 3/4" × 1/8"	2
3	Tanque	Acrílico	2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA

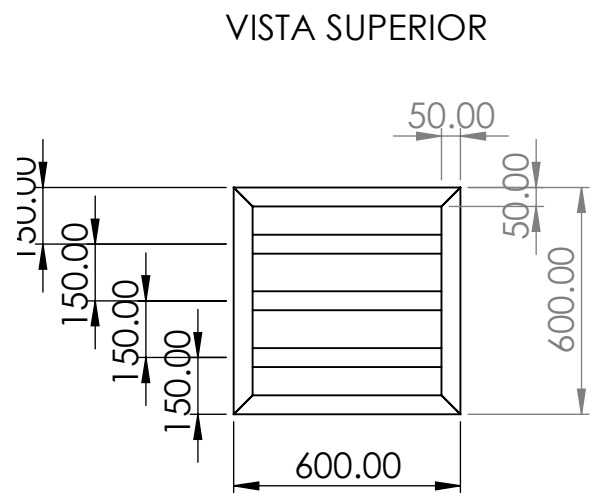
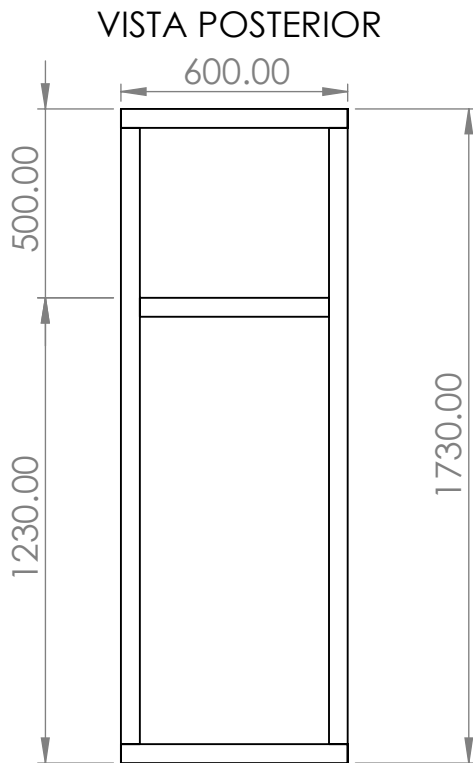
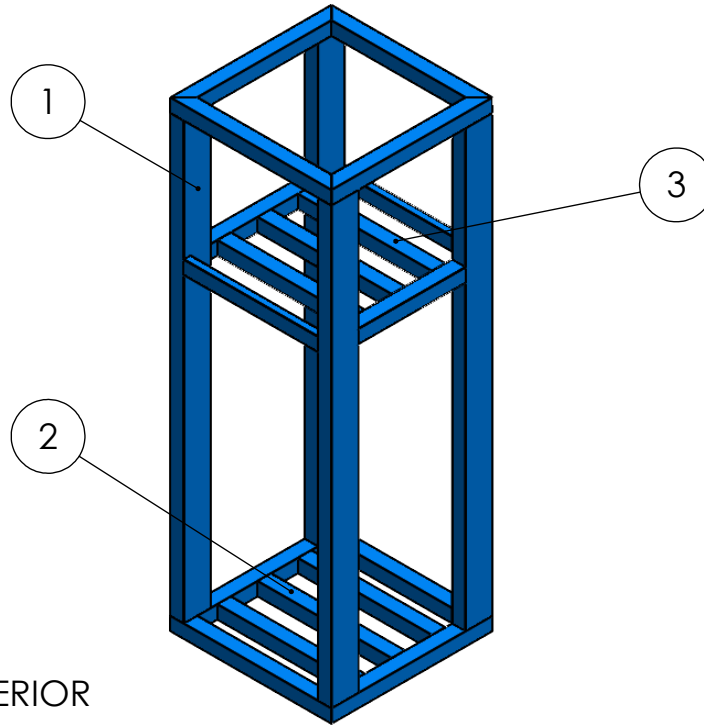


AUTORES:
Dahana Milagros Paiva García
Hilder Olivera Díaz

PROYECTO: Implementación de un prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido, para la universidad nacional de Jaén

FECHA: 01/12/2025

ESCALA: 1:8



ITEM	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Soportes verticales	Perfil tubular rectangular de 60 x 40 x 2 mm	4
2	Marco base	Tubo cuadrado de 40 mm x 40mm x 2mm	1
3	Marco superior	Tubo cuadrado de 40 mm x 40mm x 2mm	1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



AUTORES:
Dahana Milagros Paiva García
Hilder Olivera Díaz

PROYECTO: Implementación de un prototipo didáctico de control de flujo y nivel de líquido, para la universidad nacional de Jaén

FECHA: 01/12/2025

ESCALA: 1:20

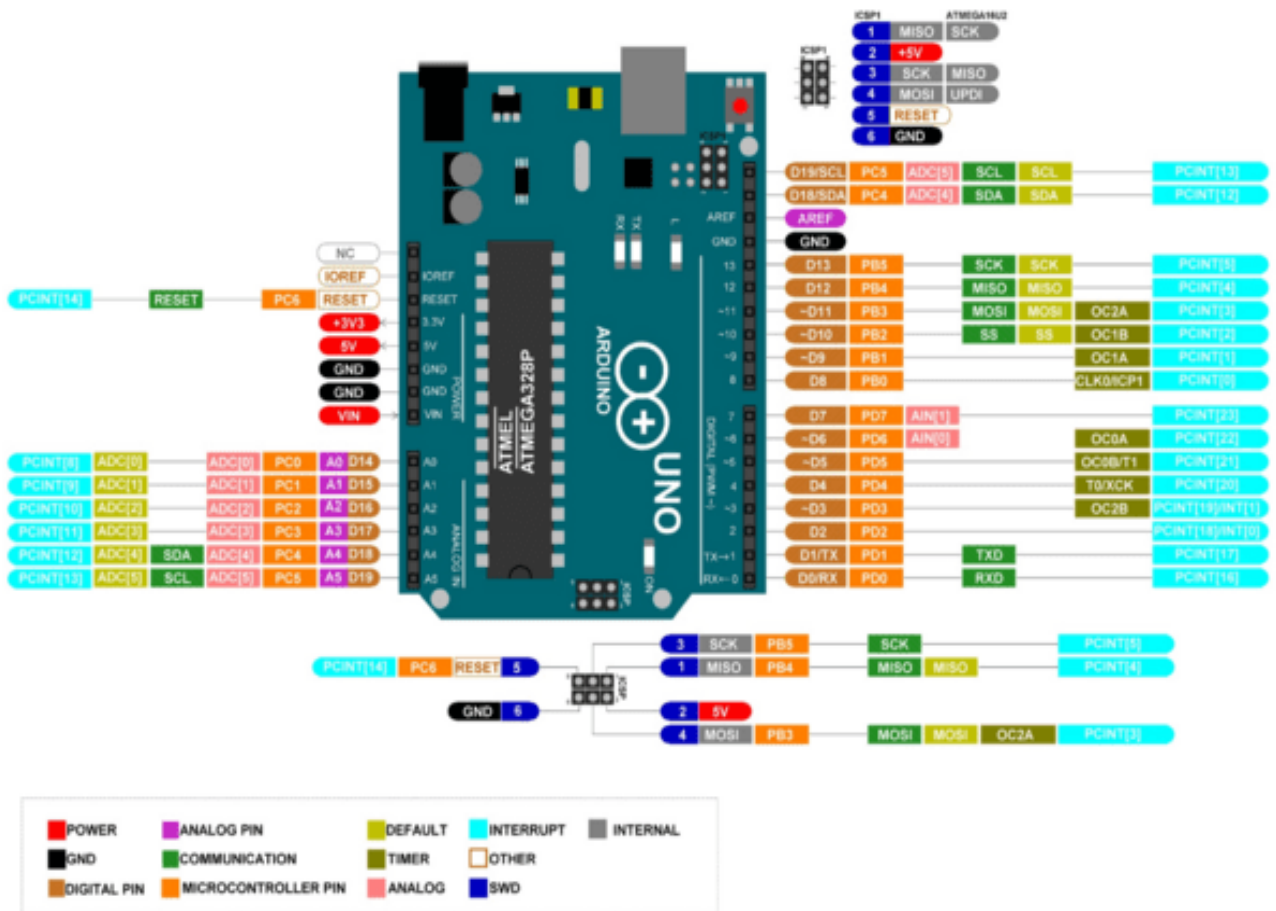
Anexo 2: Diámetros de tuberías de PVC

Tubería PVC Conduit SCH40 Long 3 metros			
Diámetros			
Nominal		Interno	Externo
Pulgadas	mm	mm	mm
1/2"	21	15,80	21,34
3/4"	26	20,93	26,67
1"	33	26,64	33,40
1 1/4"	42	35,04	42,16
1 1/2"	48	40,90	48,26
2"	60	52,50	60,32



Resolución 90708

Anexo3: Diagrama de conexiones de Arduino uno



Anexo 4: fotos de *Tesistas, asesor y soldador*



Nota. De izquierda a derecha: Persona contratada para realizar el servicio especializado, el asesor Ing. Henry, tesista Dahana y tesista Hilder

Anexo 5: Toma de datos de voltaje



Anexo 6: Códigos para los diferentes sistemas

Código Arduino para el sistema de control

```
// ===== Arduino UNO R3 - EMISOR RS485 + Sensores =====
// RS485: DI=6, RO=8, EN=7
// JSN-SR04T: Trig=A1, Echo=A2
// DHT22: Pin=4
// YF-S201 Entrada: Pin=2 (INT0)
// YF-S201 Salida: Pin=3 (INT1)
// HK3022 Presión: Pin=A0 (Analógico) - Rango: 0-500 kPa
// Bomba: Pin=9 (PWM - MOSFET)
// Electroválvula: Pin=5 (Digital - Relay ACTIVE LOW)
// Librería: SoftwareSerial, DHT

#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>

// ----- Sensores -----
#define TRIG_PIN A1
#define ECHO_PIN A2

#define DHT_PIN 4
#define DHT_TYPE DHT22
#define PRESION_PIN A0 // Sensor de presión HK3022

#define FLOW_IN_PIN 2 // Sensor caudal entrada (INT0)
#define FLOW_OUT_PIN 3 // Sensor caudal salida (INT1)
// ----- Actuadores -----
#define BOMBA_PIN 9 // PWM para MOSFET
#define ELECTROVALVULA_PIN 5 // Digital para Relay (ACTIVE LOW)
DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);
// Constantes sensores de caudal YF-S201
#define PULSOS_POR_LITRO 274.0 // 450 pulsos = 1 litro
// Constantes del tanque
#define DISTANCIA_SENSOR_AL_FONDO 58.7 // cm - Distancia desde el sensor hasta el fondo
#define ALTURA_MAXIMA_AGUA 30.0 // cm - Altura máxima de agua útil
#define ALTURA_MINIMA_TANQUE 0.0 // cm - Considera vacío cuando altura <= 0.5 cm
// ----- RS485 -----
#define RS485_RX 8 // RO del módulo
#define RS485_TX 6 // DI del módulo
#define RS485_EN 7 // DE/RE del módulo
SoftwareSerial rs485(RS485_RX, RS485_TX);
// ----- Contadores de pulsos (interrupciones) -----
volatile uint16_t pulsosIN = 0;
volatile uint16_t pulsosOUT = 0;
// ----- Datos de sensores -----
struct SensorData {
    float temperatura; // °C
    float altura; // cm (Altura REAL del agua desde el fondo: 0-35 cm)
    float presion; // kPa (kilopascales)
    float caudal_IN; // L/min
    float caudal_OUT; // L/min
    bool bomba;
    bool valvula;
    uint16_t tiempoSeg; // Tiempo en segundos
};
SensorData datos;
```

17


```
// ----- Control del sistema -----
enum EstadoSistema {
    IDLE,
    LLENANDO,
    VACIANDO_OBJETIVO,
    VACIANDO_TOTAL_POR_ALTURA,
    VACIANDO_TOTAL_POR_TIEMPO
};
EstadoSistema estadoActual = IDLE;
float alturaObjetivo = 0.0; // Altura REAL del agua objetivo (0-30 cm)
uint8_t potenciaBomba = 0; // 0-100%

// Variables para vaciado por tiempo
uint16_t tiempoVaciadoObjetivo = 0; // Segundos totales de vaciado
uint32_t inicioVaciado = 0; // Momento de inicio del vaciado
// ----- Timing -----
uint32_t lastSendTime = 0;
const uint16_t SEND_INTERVAL = 500; // Enviar cada 500ms

uint32_t lastSendExcel = 0;
const uint16_t EXCEL_INTERVAL = 1000; // Enviar a Excel cada 1 segundo

uint32_t lastReadSensors = 0;
const uint16_t SENSOR_READ_INTERVAL = 2000; // Leer sensores cada 2 segundos

uint32_t lastCalculateCaudal = 0;
const uint16_t CAUDAL_INTERVAL = 1000; // Calcular caudal cada 1 segundo

uint32_t lastUpdateTiempo = 0;
const uint16_t INTERVAL_TIEMPO = 1000; // Incrementa cada segundo

// Control Data Streamer
bool excelHeaderSent = false;

// ----- ISR - Interrupciones de sensores de caudal -----
void contarPulsosIN() {
    pulsosIN++;
}

void contarPulsosOUT() {
    pulsosOUT++;
}

// ----- RS485 Functions -----
void rs485TxMode() {
    digitalWrite(RS485_EN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
}

void rs485RxMode() {
    rs485.flush();
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(RS485_EN, LOW);
}

void rs485Send(const char* msg) {
    rs485TxMode();
    rs485.print(msg);
    rs485.flush();
    rs485RxMode();
}
```

```
}
// ----- Enviar datos al Pro Mini (Pantalla TFT)-----
void sendSensorData() {
    char buffer[100];
    char temp[10];
    // Formato: T:25.50,A:20.25,P:150.30,QI:12.50,QO:8.30,B:1,V:0,TM:2702
    // A = Altura REAL del agua (0-35 cm)
    dtostrf(datos.temperatura, 5, 2, temp);
    sprintf(buffer, "T:%s,", temp);

    dtostrf(datos.altura, 5, 2, temp);
    sprintf(buffer + strlen(buffer), "A:%s,", temp);

    dtostrf(datos.presion, 5, 2, temp);
    sprintf(buffer + strlen(buffer), "P:%s,", temp);

    dtostrf(datos.caudal_IN, 5, 2, temp);
    sprintf(buffer + strlen(buffer), "QI:%s,", temp);

    dtostrf(datos.caudal_OUT, 5, 2, temp);
    sprintf(buffer + strlen(buffer), "QO:%s,", temp);

    sprintf(buffer + strlen(buffer), "B:%d,V:%d,TM:%u\n",
            datos.bomba ? 1 : 0,
            datos.valvula ? 1 : 0,
            datos.tiempoSeg);

    rs485Send(buffer);
}
// ----- Enviar datos a Excel (Data Streamer) -----
void sendExcelHeader() {
    Serial.println("Temperatura,Altura,Presion,Caudal_IN,Caudal_OUT,Bomba,Val-
vula,Tiempo_seg");
    excelHeaderSent = true;
}
void sendDataToExcel() {
    // Formato CSV para Data Streamer
    // Altura = Altura REAL del agua (0-35 cm)
    Serial.print(datos.temperatura, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.altura, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.presion, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.caudal_IN, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.caudal_OUT, 2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.bomba ? 1 : 0);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos.valvula ? 1 : 0);
    Serial.print(",");
    Serial.println(datos.tiempoSeg);
}
// ----- Leer sensores reales -----
float leerTemperatura() {
    float t = dht.readTemperature();
```

```
// Validar lectura
if (isnan(t)) {
    return 25.0; // Valor por defecto si falla
}
return t;
}

float leerDistanciaSensor(float temperatura) {
    // Calcular velocidad del sonido compensada por temperatura
    // v = 331.3 + (0.606 × T) m/s
    float velocidadSonido = 331.3 + (0.606 * temperatura);

    // Leer distancia del sensor ultrasónico
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

    // Medir tiempo de retorno del pulso
    long duracion = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000); // Timeout 30ms

    if (duracion == 0) {
        // Si falla, mantener el valor anterior
        // Convertir altura actual de agua a distancia del sensor
        return DISTANCIA_SENSOR_AL_FONDO - datos.altura;
    }
    // Calcular distancia en cm con velocidad compensada
    // distancia = (tiempo × velocidad) / 2
    // velocidadSonido está en m/s, convertir a cm/μs: (m/s) / 10000
    float distanciaSensor = (duracion * velocidadSonido) / 20000.0;

    // Validar rango
    if (distanciaSensor < 0) distanciaSensor = 0;

    return distanciaSensor;
}

float calcularAlturaAgua(float distanciaSensor) {
    // Convertir distancia del sensor a altura real del agua
    // altura_agua = 60 - distancia_sensor
    float alturaAgua = DISTANCIA_SENSOR_AL_FONDO - distanciaSensor;

    // Validar rango (0 - 35 cm)
    if (alturaAgua < 0) alturaAgua = 0;
    if (alturaAgua > ALTURA_MAXIMA_AGUA) alturaAgua = ALTURA_MAXIMA_AGUA;

    return alturaAgua;
}

float leerPresion() {
    // Leer valor analógico del sensor (0-1023)
    int lecturaADC = analogRead(PRESION_PIN);

    // Convertir ADC a voltaje (0-5V)
    float voltaje = (lecturaADC * 5.0) / 1023.0;

    // Convertir voltaje a presión en MPa
    // Sensor HK3022: 0.5V = 0 MPa, 4.5V = 0.5 MPa
```

12

6

```
// Rango lineal: 4.0V para 0.5 MPa
float presionMPa = ((voltaje - 0.5) / 4.0) * 0.5;

// Convertir MPa a kPa (1 MPa = 1000 kPa)
float presionKPa = presionMPa * 1000.0;

// Validar rango (0 - 500 kPa, equivalente a 0 - 0.5 MPa)
if (presionKPa < 0) presionKPa = 0;
if (presionKPa > 500.0) presionKPa = 500.0;

return presionKPa;
}

void leerSensoresReales() {
// Leer temperatura del DHT22
datos.temperatura = leerTemperatura();

// Leer distancia del sensor con compensación de temperatura
float distanciaSensor = leerDistanciaSensor(datos.temperatura);

// Convertir distancia del sensor a altura REAL del agua
datos.altura = calcularAlturaAgua(distanciaSensor);

// Leer presión del sensor HK3022 en kPa
datos.presion = leerPresion();
}

// ----- Calcular caudal real -----
void calcularCaudales() {
// Deshabilitar interrupciones temporalmente para leer contadores
noInterrupts();
uint16_t pulsos_in = pulsosIN;
uint16_t pulsos_out = pulsosOUT;
pulsosIN = 0; // Resetear contador
pulsosOUT = 0; // Resetear contador
interrupts();
// Calcular caudal en L/min
// Caudal = (pulsos / 275) litros por segundo = L/seg
// Simplificado: Caudal = (pulsos * 60) / 275
datos.caudal_IN = (pulsos_in) / PULSOS_POR_LITRO;
datos.caudal_OUT = (pulsos_out) / PULSOS_POR_LITRO;

// Validar rango del sensor (1-30 L/min)
if (datos.caudal_IN > 0.5) datos.caudal_IN = 0.5;
if (datos.caudal_OUT > 0.5) datos.caudal_OUT = 0.5;
}

// ----- Control de actuadores -----
void activarBomba(uint8_t potencia) {
// Convertir potencia 0-100% a PWM 0-255
uint8_t valorPWM = map(potencia, 0, 100, 0, 255);
analogWrite(BOMBA_PIN, valorPWM);
datos.bomba = true;
}

void apagarBomba() {
analogWrite(BOMBA_PIN, 0);
datos.bomba = false;
}
}
```

```
void activarElectrovalvula() {
    digitalWrite(ELECTROVALVULA_PIN, LOW); // ACTIVE LOW - Se activa con LOW
    datos.valvula = true;
}

void apagarElectrovalvula() {
    digitalWrite(ELECTROVALVULA_PIN, HIGH); // ACTIVE LOW - Se apaga con HIGH
    datos.valvula = false;
}

void detenerSistema() {
    // Apagar ambos actuadores
    analogWrite(BOMBA_PIN, 0); // Bomba: PWM = 0
    digitalWrite(ELECTROVALVULA_PIN, HIGH); // Electroválvula: HIGH = OFF (active LOW)

    // Actualizar estados
    datos.bomba = false;
    datos.valvula = false;
    estadoActual = IDLE;
}

// ----- Procesar comandos Serial -----
void processSerialCommands() {
    if (Serial.available()) {
        String cmd = Serial.readStringUntil('\n');
        cmd.trim();

        // Comando: S: altura, potencia
        if (cmd.startsWith("S:")) {
            // Extraer altura y potencia
            int comaPos = cmd.indexOf(',');
            if (comaPos > 0) {
                String alturaStr = cmd.substring(2, comaPos);
                String potenciaStr = cmd.substring(comaPos + 1);

                alturaStr.trim();
                potenciaStr.trim();

                float alturaDeseada = alturaStr.toFloat(); // Altura REAL del agua (0-35 cm)
                uint8_t potencia = potenciaStr.toInt();

                // Validar altura (debe estar entre 0 y 35 cm)
                if (alturaDeseada < 0 || alturaDeseada > ALTURA_MAXIMA_AGUA) {
                    Serial.print("ERROR: Altura debe estar entre 0 y 30");
                    Serial.print(ALTURA_MAXIMA_AGUA);
                    Serial.println(" cm");
                    return;
                }
            }
            // Validar potencia (ignorar si es 0)
            if (potencia == 0) {
                Serial.println("ERROR: Potencia invalida (debe ser 1-100%)");
                return;
            }

            // DETENER TODO EL SISTEMA PRIMERO
            detenerSistema();
            delay(100); // Pequeña pausa para asegurar que todo se apague
        }
    }
}
```

```
// Guardar parámetros (altura REAL del agua)
alturaObjetivo = alturaDeseada;
potenciaBomba = potencia;

// REINICIAR cronómetro
datos.tiempoSeg = 0;
lastUpdateTiempo = millis();

// Determinar acción según altura actual
if (datos.altura < alturaObjetivo) {
    // LLENAR: altura actual es menor, necesitamos llenar
    estadoActual = LLENANDO;
    activarBomba(potenciaBomba);
    Serial.print("LLENANDO hasta ");
    Serial.print(alturaObjetivo);
    Serial.print("cm a ");
    Serial.print(potenciaBomba);
    Serial.println("% de potencia");
} else if (datos.altura > alturaObjetivo) {
    // VACIAR: altura actual es mayor, necesitamos vaciar
    estadoActual = VACIANDO_OBJETIVO;
    activarElectrovalvula();
    Serial.print("VACIANDO hasta ");
    Serial.print(alturaObjetivo);
    Serial.println("cm");
} else {
    // Ya estamos en el objetivo
    Serial.println("Ya se encuentra en la altura objetivo");
}
}

// Comando: VACIAR o VACIAR, tiempo
else if (cmd.startsWith("V")) {
    // DETENER TODO EL SISTEMA PRIMERO
    detenerSistema();
    delay(100); // Pequeña pausa para asegurar que todo se apague

    // REINICIAR cronómetro
    datos.tiempoSeg = 0;
    lastUpdateTiempo = millis();

    // Verificar si tiene parámetro de tiempo
    int comaPos = cmd.indexOf(',');

    if (comaPos > 0) {
        // VACIAR con tiempo: VACIAR, 30
        String tiempoStr = cmd.substring(comaPos + 1);
        tiempoStr.trim();
        tiempoVaciadoObjetivo = tiempoStr.toInt();

        if (tiempoVaciadoObjetivo == 0) {
            Serial.println("ERROR: Tiempo debe ser mayor a 0 segundos");
            return;
        }
    }
    estadoActual = VACIANDO_TOTAL_POR_TIEMPO;
    inicioVaciado = millis();
    activarElectrovalvula();
}
```

```
Serial.print("VACIANDO por ");
Serial.print(tiempoVaciadoObjetivo);
Serial.println(" segundos");
} else {
    // VACIAR sin parámetros: vaciar hasta altura = 0
    estadoActual = VACIANDO_TOTAL_POR_ALTURA;
    activarElectrovalvula();
    Serial.println("VACIANDO hasta altura = 0 cm");
}
}
else if (cmd.startsWith("S")) {
    detenerSistema();
}
}
}
// ----- Control automático del sistema -----
void controlAutomatico() {
    uint32_t now = millis();

    switch (estadoActual) {
        case LLENANDO:
            // Verificar si alcanzamos o nos pasamos del objetivo
            if (datos.altura >= alturaObjetivo) {
                apagarBomba();
                estadoActual = IDLE;
                Serial.print("Altura objetivo alcanzada: ");
                Serial.print(datos.altura);
                Serial.print("cm en ");
                Serial.print(datos.tiempoSeg);
                Serial.println(" segundos");
            }
            break;
        case VACIANDO_OBJETIVO:
            // Verificar si alcanzamos o nos pasamos del objetivo
            if (datos.altura <= alturaObjetivo) {
                apagarElectrovalvula();
                estadoActual = IDLE;
                Serial.print("Altura objetivo alcanzada: ");
                Serial.print(datos.altura);
                Serial.print("cm en ");
                Serial.print(datos.tiempoSeg);
                Serial.println(" segundos");
            }
            break;
        case VACIANDO_TOTAL_POR_ALTURA:
            // SOLO verificar altura, sin lógica de tiempo
            if (datos.altura <= ALTURA_MINIMA_TANQUE) {
                apagarElectrovalvula();
                estadoActual = IDLE;
                Serial.print("Tanque vaciado: altura ");
                Serial.print(datos.altura);
                Serial.print("cm alcanzada en ");
                Serial.print(datos.tiempoSeg);
                Serial.println(" segundos");
            }
            break;
    }
}
```

```
case VACIANDO_TOTAL_POR_TIEMPO:
    // Verificar si pasó el tiempo objetivo
    uint32_t tiempoTranscurrido = (now - inicioVaciado) / 1000; // Convertir a segundos

    if (tiempoTranscurrido >= tiempoVaciadoObjetivo) {
        apagarElectrovalvula();
        estadoActual = IDLE;
        Serial.print("Vaciado por tiempo completado: ");
        Serial.print(tiempoVaciadoObjetivo);
        Serial.print(" segundos - Altura final: ");
        Serial.print(datos.altura);
        Serial.println(" cm");
    }
    break;

case IDLE:
    // No hacer nada
    break;
}

// ----- Actualizar cronómetro -----
void actualizarCronometro() {
    uint32_t now = millis();

    // Incrementar cronómetro cuando el sistema está ACTIVO (no IDLE)
    if (estadoActual != IDLE && now - lastUpdateTiempo >= INTERVAL_TIEMPO) {
        lastUpdateTiempo = now;
        datos.tiempoSeg++;

        // Limitar a 99:59 (5999 segundos)
        if (datos.tiempoSeg > 5999) {
            datos.tiempoSeg = 5999;
        }
    }
}

// ----- Actualizar datos -----
void updateData() {
    uint32_t now = millis();

    // Leer sensores reales cada 2 segundos
    if (now - lastReadSensors >= SENSOR_READ_INTERVAL) {
        lastReadSensors = now;
        leerSensoresReales();
    }

    // Calcular caudales reales cada 1 segundo
    if (now - lastCalculateCaudal >= CAUDAL_INTERVAL) {
        lastCalculateCaudal = now;
        calcularCaudales();
    }

    // Actualizar cronómetro
    actualizarCronometro();
}
```



```
// Control automático del sistema
controlAutomatico();
}

// ----- Setup -----
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  rs485.begin(9600);

  pinMode(RS485_EN, OUTPUT);
  rs485RxMode();

  // Configurar pines del sensor ultrasónico
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

  // Configurar pines de actuadores Y APAGARLOS INMEDIATAMENTE
  pinMode(BOMBA_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ELECTROVALVULA_PIN, OUTPUT);

  // CRÍTICO: Apagar actuadores al inicio
  analogWrite(BOMBA_PIN, 0); // Bomba OFF
  digitalWrite(ELECTROVALVULA_PIN, HIGH); // Electroválvula OFF (active LOW)

  datos.bomba = false;
  datos.valvula = false;

  // Configurar pines de sensores de caudal
  pinMode(FLOW_IN_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(FLOW_OUT_PIN, INPUT_PULLUP);

  // Configurar interrupciones para sensores de caudal
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_IN_PIN), contarPulsosIN, RISING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_OUT_PIN), contarPulsosOUT, RISING);

  // Inicializar DHT22
  dht.begin();

  randomSeed(analogRead(A3)); // Usar A3 para random, A0 está ocupado

  // Leer valores iniciales de sensores reales
  delay(2000); // Esperar estabilización del DHT22
  datos.temperatura = leerTemperatura();
  float distanciaSensor = leerDistanciaSensor(datos.temperatura);
  datos.altura = calcularAlturaAgua(distanciaSensor);
  datos.presion = leerPresion();

  // Inicializar datos
  datos.caudal_IN = 0.0;
  datos.caudal_OUT = 0.0;
  datos.tiempoSeg = 0;

  uint32_t now = millis();
  lastReadSensors = now;
  lastCalculateCaudal = now;
  lastUpdateTiempo = now;
  lastSendTime = now;
}
```

```

lastSendExcel = now;

delay(1000);

// Enviar encabezados CSV para Excel Data Streamer
sendExcelHeader();

Serial.println("Sistema iniciado - Actuadores apagados");
Serial.print("Altura maxima: ");
Serial.print(ALTURA_MAXIMA_AGUA);
Serial.println(" cm");
Serial.println("Comandos disponibles:");
Serial.println("- S: altura, potencia (ejemplo: S: 20, 90)");
Serial.println("- VACIAR (vacía hasta 0 cm)");
Serial.println("- VACIAR, tiempo (ejemplo: VACIAR, 30)");
}

// ----- Loop -----
void loop() {
  // Actualizar sensores y control automático
  updateData();

  // Enviar datos al Pro Mini vía RS485 periódicamente
  if (millis() - lastSendTime >= SEND_INTERVAL) {
    lastSendTime = millis();
    sendSensorData();
  }

  // Enviar datos a Excel cada 1 segundo
  if (millis() - lastSendExcel >= EXCEL_INTERVAL) {
    lastSendExcel = millis();
    sendDataToExcel();
  }

  // Procesar comandos del Serial Monitor
  processSerialCommands();
}

```

Código Arduino pro mini para la pantalla

```

1 // ===== Arduino Pro Mini - PANTALLA VISUALIZACIÓN RS485 =====
2 // Pro Mini 3.3V / 8MHz
3 // RS485: RX=0, TX=1, EN=8
4 // Pantalla TFT ST7789 240x320 (landscape 320x240)
5 // SIN BOTONES - SOLO VISUALIZACIÓN
6 // Librerías: Adafruit_GFX, Adafruit_ST7735_and_ST7789
7
8 #include <SPI.h>
9 #include <Adafruit_GFX.h>
10 #include <Adafruit_ST7789.h>
11
12 // ----- Serial / RS485 -----
13 #define SERIAL_BAUD 9600
14 #define RS485_EN 8

```

19

```
15
16 // ----- TFT -----
17 #define TFT_CS 10
18 #define TFT_DC 9
19 #define TFT_RST 2
20 Adafruit_ST7789 tft(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);
21
22 // ----- Colores -----
23 #define COLOR_CYAN 0x07FF
24 #define COLOR_BORDER 0x4208
25 #define COLOR_CELL_BG 0x1082
26
27 // ----- Dimensiones de celdas -----
28 #define CELL_WIDTH 105
29 #define CELL_HEIGHT 75
30 #define CELL_MARGIN 2
31 #define GRID_START_X 2
32 #define GRID_START_Y 2
33
34 // Celdas inferiores
35 #define CELL_VALVULA_W 100
36 #define CELL_TIEMPO_W 214
37 #define CELL_BOTTOM_H 75
38 #define BOTTOM_Y 162
39
40 // ----- Datos de sensores -----
41 struct SensorData {
42     float temperatura;
43     float altura;
44     float presion;
45     float caudalIN;
46     float caudalON;
47     bool bomba;
48     bool valvula;
49     uint16_t tiempoSeg; // Tiempo en segundos
50 };
51 SensorData datos;
52 SensorData datosPrev;
53
54 // ----- Buffer RS485 -----
55 #define RS485_BUFFER_SIZE 100
56 char rs485Buffer[RS485_BUFFER_SIZE];
57 uint8_t rs485Pos = 0;
58
59 // ----- RS485 Functions -----
60 void rs485RxMode() {
61     Serial.flush();
62     delayMicroseconds(10);
63     digitalWrite(RS485_EN, LOW);
64 }
65
66 // Parsear: T:25.50,A:150.25,P:5.30,QI:12.50,QO:8.30,B:1,V:0,TM:2702
67 void parseRS485Data(char* buffer) {
68     char* token = strtok(buffer, ",");
69
70     while (token != NULL) {
```

```
71     if (token[0] == 'T' && token[1] == ':') {
72         datos.temperatura = atof(token + 2);
73     } else if (token[0] == 'A' && token[1] == ':') {
74         datos.altura = atof(token + 2);
75     } else if (token[0] == 'P' && token[1] == ':') {
76         datos.presion = atof(token + 2);
77     } else if (token[0] == 'Q' && token[1] == 'I' && token[2] == ':') {
78         datos.caudalIN = atof(token + 3);
79     } else if (token[0] == 'Q' && token[1] == 'O' && token[2] == ':') {
80         datos.caudalON = atof(token + 3);
81     } else if (token[0] == 'B' && token[1] == ':') {
82         datos.bomba = (atoi(token + 2) == 1);
83     } else if (token[0] == 'V' && token[1] == ':') {
84         datos.valvula = (atoi(token + 2) == 1);
85     } else if (token[0] == 'T' && token[1] == 'M' && token[2] == ':') {
86         datos.tiempoSeg = atoi(token + 3);
87     }
88
89     token = strtok(NULL, ",");
90 }
91 }
92
93 void processRS485() {
94     while (Serial.available()) {
95         char c = Serial.read();
96
97         if (c == '\n' || c == '\r') {
98             if (rs485Pos > 0) {
99                 rs485Buffer[rs485Pos] = '\0';
100                 parseRS485Data(rs485Buffer);
101                 rs485Pos = 0;
102             }
103         } else if (rs485Pos < RS485_BUFFER_SIZE - 1) {
104             rs485Buffer[rs485Pos++] = c;
105         }
106     }
107 }
108
109 // ----- TFT Reset -----
110 static void hardResetTFT() {
111     pinMode(TFT_RST, OUTPUT);
112     digitalWrite(TFT_RST, HIGH);
113     delay(5);
114     digitalWrite(TFT_RST, LOW);
115     delay(20);
116     digitalWrite(TFT_RST, HIGH);
117     delay(150);
118 }
119
120 // ----- UI: Dibujar celda -----
121 void drawCell(int x, int y, int w, int h) {
122     tft.fillRect(x, y, w, h, COLOR_CELL_BG);
123     tft.drawRect(x, y, w, h, COLOR_BORDER);
124     tft.drawRect(x + 1, y + 1, w - 2, h - 2, COLOR_BORDER);
125 }
126
```

20

24

```
127 // ----- Dibujar valores con etiqueta -----
128 void drawSensorValue(int x, int y, const char* label, float value, const char* unit) {
129     drawCell(x, y, CELL_WIDTH, CELL_HEIGHT);
130
131     tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);
132     tft.setTextSize(2);
133     tft.setCursor(x + 4, y + 4);
134     tft.print(label);
135
136     tft.setTextColor(COLOR_CYAN);
137     tft.setTextSize(2);
138     char buf[16];
139     dtostrf(value, 5, 2, buf);
140     tft.setCursor(x + 4, y + 24);
141     tft.print(buf);
142
143     tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);
144     tft.setTextSize(2);
145     tft.setCursor(x + 4, y + 48);
146     tft.print(unit);
147 }
148
149 void drawBombaValue(int x, int y) {
150     drawCell(x, y, CELL_WIDTH, CELL_HEIGHT);
151
152     tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);
153     tft.setTextSize(2);
154     tft.setCursor(x + 4, y + 4);
155     tft.print("Bomba");
156
157     tft.setTextColor(datos.bomba ? ST77XX_GREEN : ST77XX_RED);
158     tft.setTextSize(2);
159     tft.setCursor(x + 4, y + 24);
160     tft.print(datos.bomba ? "True" : "False");
161 }
162
163 void drawValvulaValue(int x, int y) {
164     drawCell(x, y, CELL_VALVULA_W, CELL_BOTTOM_H);
165
166     tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);
167     tft.setTextSize(2);
168     tft.setCursor(x + 4, y + 4);
169     tft.print("Valvula");
170
171     tft.setTextColor(datos.valvula ? ST77XX_GREEN : ST77XX_RED);
172     tft.setTextSize(2);
173     tft.setCursor(x + 8, y + 28);
174     tft.print(datos.valvula ? "High" : "Low");
175 }
176
177 void drawTiempoValue(int x, int y) {
178     drawCell(x, y, CELL_TIEMPO_W, CELL_BOTTOM_H);
179
180     // Calcular minutos y segundos
181     uint16_t minutos = datos.tiempoSeg / 60;
182     uint8_t segundos = datos.tiempoSeg % 60;
```

```
183
184 tft.setTextColor(COLOR_CYAN);
185 tft.setTextSize(5);
186
187 char timeStr[8];
188 sprintf(timeStr, "%02d:%02d", minutos, segundos);
189
190 // Centrar el texto
191 tft.setCursor(x + 20, y + 20);
192 tft.print(timeStr);
193 }
194
195 // ----- Actualizar solo números -----
196 void updateSensorNumber(int x, int y, float value) {
197 tft.fillRect(x + 4, y + 24, 95, 16, COLOR_CELL_BG);
198
199 tft.setTextColor(COLOR_CYAN);
200 tft.setTextSize(2);
201 char buf[16];
202 dtostrf(value, 5, 2, buf);
203 tft.setCursor(x + 4, y + 24);
204 tft.print(buf);
205 }
206
207 void updateBombaNumber(int x, int y) {
208 tft.fillRect(x + 4, y + 24, 95, 16, COLOR_CELL_BG);
209
210 tft.setTextColor(datos.bomba ? ST77XX_GREEN : ST77XX_RED);
211 tft.setTextSize(2);
212 tft.setCursor(x + 4, y + 24);
213 tft.print(datos.bomba ? "True " : "False");
214 }
215
216 void updateValvulaNumber(int x, int y) {
217 tft.fillRect(x + 8, y + 28, 80, 16, COLOR_CELL_BG);
218
219 tft.setTextColor(datos.valvula ? ST77XX_GREEN : ST77XX_RED);
220 tft.setTextSize(2);
221 tft.setCursor(x + 8, y + 28);
222 tft.print(datos.valvula ? "High " : "Low ");
223 }
224
225 void updateTiempoNumber(int x, int y) {
226 tft.fillRect(x + 20, y + 20, 175, 35, COLOR_CELL_BG);
227
228 uint16_t minutos = datos.tiempoSeg / 60;
229 uint8_t segundos = datos.tiempoSeg % 60;
230
231 tft.setTextColor(COLOR_CYAN);
232 tft.setTextSize(5);
233
234 char timeStr[8];
235 sprintf(timeStr, "%02d:%02d", minutos, segundos);
236
237 tft.setCursor(x + 20, y + 20);
238 tft.print(timeStr);
```

```
239 }
240
241 // ----- Dibujar dashboard completo -----
242 void drawDashboard() {
243     tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
244
245     // Fila 1: Temperatura, Altura, Presión
246     int x0 = GRID_START_X;
247     int x1 = GRID_START_X + CELL_WIDTH + CELL_MARGIN;
248     int x2 = GRID_START_X + 2 * (CELL_WIDTH + CELL_MARGIN);
249     int y0 = GRID_START_Y;
250     int y1 = GRID_START_Y + CELL_HEIGHT + CELL_MARGIN;
251
252     drawSensorValue(x0, y0, "Temp", datos.temperatura, "C");
253     drawSensorValue(x1, y0, "Altura", datos.altura, "cm");
254     drawSensorValue(x2, y0, "Presion", datos.presion, "kpa");
255
256     // Fila 2: Q_in, Q_out, Bomba
257     drawSensorValue(x0, y1, "Q_in", datos.caudalIN, "L/min");
258     drawSensorValue(x1, y1, "Q_out", datos.caudalON, "L/min");
259     drawBombaValue(x2, y1);
260
261     // Fila 3: Válvula | Tiempo
262     int xValvula = GRID_START_X;
263     int xTiempo = GRID_START_X + CELL_VALVULA_W + CELL_MARGIN;
264
265     drawValvulaValue(xValvula, BOTTOM_Y);
266     drawTiempoValue(xTiempo, BOTTOM_Y);
267 }
268
269 // ----- Setup -----
270 void setup() {
271     Serial.begin(SERIAL_BAUD);
272     delay(50);
273
274     pinMode(RS485_EN, OUTPUT);
275     rs485RxMode();
276
277     hardResetTFT();
278     tft.init(240, 320);
279     tft.setRotation(1);
280     tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
281
282     // Inicializar datos
283     datos.temperatura = 0.0;
284     datos.altura = 0.0;
285     datos.presion = 0.0;
286     datos.caudalIN = 0.0;
287     datos.caudalON = 0.0;
288     datos.bomba = false;
289     datos.valvula = false;
290     datos.tiempoSeg = 0;
291
292     datosPrev = datos;
293
294     drawDashboard();
```

```
295 }
296 // ----- Loop -----
297 void loop() {
298   processRS485();
299
300   // Calcular posiciones
301   int x0 = GRID_START_X;
302   int x1 = GRID_START_X + CELL_WIDTH + CELL_MARGIN;
303   int x2 = GRID_START_X + 2 * (CELL_WIDTH + CELL_MARGIN);
304   int y0 = GRID_START_Y;
305   int y1 = GRID_START_Y + CELL_HEIGHT + CELL_MARGIN;
306   int xValvula = GRID_START_X;
307   int xTiempo = GRID_START_X + CELL_VALVULA_W + CELL_MARGIN;
308
309   // Actualizar solo valores que cambiaron
310   if (datos.temperatura != datosPrev.temperatura) {
311     updateSensorNumber(x0, y0, datos.temperatura);
312     datosPrev.temperatura = datos.temperatura;
313   }
314   if (datos.altura != datosPrev.altura) {
315     updateSensorNumber(x1, y0, datos.altura);
316     datosPrev.altura = datos.altura;
317   }
318   if (datos.presion != datosPrev.presion) {
319     updateSensorNumber(x2, y0, datos.presion);
320     datosPrev.presion = datos.presion;
321   }
322   if (datos.caudalIN != datosPrev.caudalIN) {
323     updateSensorNumber(x0, y1, datos.caudalIN);
324     datosPrev.caudalIN = datos.caudalIN;
325   }
326   if (datos.caudalON != datosPrev.caudalON) {
327     updateSensorNumber(x1, y1, datos.caudalON);
328     datosPrev.caudalON = datos.caudalON;
329   }
330   if (datos.bomba != datosPrev.bomba) {
331     updateBombaNumber(x2, y1);
332     datosPrev.bomba = datos.bomba;
333   }
334   if (datos.valvula != datosPrev.valvula) {
335     updateValvulaNumber(xValvula, BOTTOM_Y);
336     datosPrev.valvula = datos.valvula;
337   }
338   if (datos.tiempoSeg != datosPrev.tiempoSeg) {
339     updateTiempoNumber(xTiempo, BOTTOM_Y);
340     datosPrev.tiempoSeg = datos.tiempoSeg;
341   }
342
343   delay(5);
344 }
345
```


Código del modelo matemático en python

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

class SistemaTanque:
    def __init__(self, largo, ancho, alto):
        # Parámetros geométricos del tanque (cm)
        self.area_base = largo * ancho # cm^2
        self.altura_max = alto # cm
        self.nivel_actual = 0.0 # cm (Empieza vacío)

        # Parámetros de la Bomba (Tu regresión lineal)
        # Q = m * PWM + b
        self.m_bomba = 0.0164
        self.b_bomba = -1.7447

    def modelo_bomba(self, pwm):
        """
        Convierte PWM (0-255) a Caudal (Litros/min).
        Incluye la zona muerta.
        """
        caudal_L_min = (self.m_bomba * pwm) + self.b_bomba

        # Restricción física: La bomba no succiona hacia atrás (Zona muerta)
        if caudal_L_min < 0:
            caudal_L_min = 0.0

        return caudal_L_min

    def actualizar_nivel(self, pwm_input, delta_tiempo_seg):
        """
        Calcula el nuevo nivel del tanque basado en el flujo de entrada.
        delta_tiempo_seg: Cuánto tiempo ha pasado desde la última lectura.
        """
        # 1. Obtener caudal en Litros/min
        q_L_min = self.modelo_bomba(pwm_input)

        # 2. Convertir Caudal a cm^3/segundo para ser consistente con el tanque
        # 1 Litro = 1000 cm^3 | 1 min = 60 seg
        q_cm3_seg = (q_L_min * 1000) / 60

        # 3. Ecuación Diferencial Discreta: h(t) = h(t-1) + (Q/Area)*dt
        delta_altura = (q_cm3_seg / self.area_base) * delta_tiempo_seg

        # Actualizamos nivel
        self.nivel_actual += delta_altura

        # Saturación (Si se desborda, se queda en el máximo)
        if self.nivel_actual > self.altura_max:
            self.nivel_actual = self.altura_max

        return self.nivel_actual

# --- CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN ---

# 1. Creamos el objeto Tanque con tus medidas: 30cm x 48cm x 30cm
```

```
mi_tanque = SistemaTanque(largo=30, ancho=48, alto=30)

# 2. Definimos el tiempo de simulación
tiempo_total_min = 25 # Simular 25 minutos
dt = 1.0 # Pasos de 1 segundo
pasos = int((tiempo_total_min * 60) / dt)

# Arrays para guardar datos y graficar
tiempo = []
nivel_agua = []
pwm_aplicado = []

# Vamos a probar con un PWM constante de 220 (aprox 85% de potencia)
pwm_constante = 255

# --- BUCLE DE SIMULACIÓN ---
print(f"Iniciando simulación de llenado (PWM={pwm_constante})...")

for t in range(pasos):
    tiempo_seg = t * dt

    # Aquí llamamos a la función que integra bomba + tanque
    h = mi_tanque.actualizar_nivel(pwm_constante, dt)

    # Guardamos datos
    tiempo.append(tiempo_seg / 60) # Guardar en minutos
    nivel_agua.append(h)
    pwm_aplicado.append(pwm_constante)

    # Si se llena, avisar
    if h >= mi_tanque.altura_max:
        print(f";Tanque lleno en {tiempo_seg/60:.2f} minutos!")
        break

# --- GRAFICAR RESULTADOS ---
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(tiempo, nivel_agua, label='Nivel del Tanque (cm)', color='blue', linewidth=2)
plt.axhline(y=30, color='r', linestyle='--', label='Altura Máxima (30cm)')

plt.title(f'MODELO MATEMATICO REAL - Llenado del Tanque con PWM={pwm_constante}')
plt.xlabel('Tiempo (minutos)')
plt.ylabel('Nivel de agua (cm)')
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.legend()
plt.show()
```