IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL DE AGUA CON MONITOREO DE VARIABLES PARA EL MODELO A ESCALA 1:50 DE LA PLANTA EXISTENTE EN LA FINCA SAN JOSÉ DEL MUNICIPIO DE COTA

David Santiago Diaz Camacho



Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Electrónica

Bogotá, Colombia

2025

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL DE AGUA CON MONITOREO DE VARIABLES PARA EL MODELO A ESCALA 1:50 DE LA PLANTA EXISTENTE EN LA FINCA SAN JOSÉ DEL MUNICIPIO DE COTA

David Santiago Diaz Camacho

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Oscar Mauricio Gelvez Lizarazo. MsC

Codirigido por:

Carlos Andrés Torres Pinzón. PhD

Mayra Alejandra Bejarano Rodríguez. Esp

Grupo de Investigación MEM (Modelado-Electrónica-Monitoreo)

Facultad de Ingeniería Electrónica

División de Ingenierías

2025

Autoridades de la universidad

RECTOR GENERAL

Fray Álvaro José Arango Restrepo, O.P

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

Fray Hender Alveiro Rodríguez Pérez, O.P

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

Fray Mauricio Antonio Cortés Gallego, O.P

SECRETARIO GENERAL

Dra. Lina Marcela Camargo Martínez

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Fray Javier Antonio Hincapié Ardila, O.P

SECRETARIA DE DIVISIÓN

Econ. Luz Patricia Rocha Caicedo

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MsC. Leonardo Fabio Yepes Arbeláez

Nota de aceptación

_____

Firma del tutor

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. _____ DE 2025

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

A mis abuelitos, tías y primos.

Pero en especial a mi madre, la mujer que hoy día me sigue dando lecciones de cómo ser un buen ser humano y afrontar los desafíos de la vida.

Gracias por ser mi guía en el camino, por tu apoyo, tu paciencia y tu esmero.

Y a mi tía, que desde el cielo me acompaña y me da fuerza.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo. A mi madre y mi tía Nubia, por recordarme siempre el lado bueno en la adversidad. A Alexandra Rincón, por su apoyo incondicional, su comprensión en los momentos más difíciles, las noches de trasnocho, su paciencia y toda la calma que me brindó durante este viaje hacía la culminación de este proyecto. A Sergio, Jonathan y Juan por los buenos momentos compartidos en clase y sus valiosas recomendaciones y a Juan Rivera por su ayuda en el último esfuerzo. Finalmente, extiendo mi gratitud al equipo de laboratoristas que me acompañó durante este viaje académico.

Contenido

Resumen 10
Abstract 11
Lista de Imágenes 12
Lista de Figuras 13
Lista de Tablas 14
Lista de Ilustraciones 15
Lista de Gráficas 16
Glosario de Abreviaciones 17
1. INTRODUCCIÓN 18
1.1 Planteamiento del problema 18
1.2 Objetivos 19
1.2.1.1 General 19
1.2.1.2 Específicos 19
1.3 Justificación 20
1.4 Impacto Social 22
2. ESTADO DEL ARTE 23
2.1 Medición y Monitoreo de nivel en sistemas de almacenamiento de agua 23
2.2 Medición de caudal en redes de distribución de agua 23
2.3 Control de nivel y caudal en sistemas de almacenamiento y distribución 24
3. MARCO TEÓRICO 25
3.1 Sketch Up 25
3.2 Controlador 25
3.2.1.1 PID 26
3.2.1.2 MPC 27
3.2.1.3 FUZZY LOGIC 28
3.2.1.4 IMC 29
3.3 Métodos de sintonización 29
3.3.1.1 Ziegler-Nichols 30
3.4 Digitalización 30
3.4.1.1 Retenedor de Orden Cero (ZOH) 30
3.4.1.2 Transformación bilineal (Tustin) 30
3.5 Matriz de Pugh 31

3.6 MATLAB 31
3.7 System Identificiation Toolbox 32
3.8 Microcontrolador 32
3.9 ARDUINO 32
3.10 Medidores de nivel 33
3.11 Medidores de caudal 34
3.12 Linealización 35
3.13 Actuadores 35
3.14 Monitoreo 36
3.15 FreeRTOS 36
3.16 Internet de las cosas (IOT) 37
3.17 Protocolos de comunicación 37
3.18 Plataforma de visualización remota 38
3.19 Software de diseño electrónico 38
4. DISEÑO METODOLÓGICO 39
5. DISEÑO DEL SISTEMA 40
5.1 Modelado del Sistema 40
5.1.1 Modelado 3D 40
5.1.2 Representación matemática 42
5.1.2.1 Representación matemática del Modelo Paralelo 43
5.1.2.2 Representación matemática del Modelo Serie 43
5.1.2.3 Representación matemática del Modelo Mixto 44
5.1.3 Selección del Modelo 46
5.2 Selección de técnica de control 49
5.3 Integración de sensores 51
5.3.1 Selección de medidor de Nivel 51
5.3.1.1 Sensor de ultrasonido HC-SR04 53
5.3.1.1 Caracterización del sensor de Nivel 53
5.3.1.2 Linealización del sensor HC-SR04 54
5.3.2 Selección de medidor de caudal 56
5.3.2.1 Sensor YF-S201 57
5.3.2.2 Caracterización del sensor de Caudal 58
5.3.2.3 Linealización del sensor YF-S201 59
5.4 Modelo dinámico del actuador 61

5.4.1 Representación matemática del actuador 61
5.5 Diseño Electrónico 62
5.5.1 Diseño de circuito 62
5.6 Código fuente 65
6. RESULTADOS 68
6.1 Simulación del modelo 68
6.2 Prototipo a escala 69
6.3 Comparación del funcionamiento del prototipo con el concepto técnico de la empresa Sanitarias e hidráulicas Manuel Rincon S.A.S. 70
7. CONCLUSIONES 71
8. ANEXOS 73
BIBLIOGRAFÍA 74

Resumen

El proyecto está centrado en la problemática presentada en lugares donde el abastecimiento de agua es un problema diario debido a las limitaciones de tiempo y trayecto entre comunidades. Su enfoque principal es la toma de decisiones informadas a partir de la adquisición y visualización de datos relacionados con el almacenamiento y distribución.

Para tal fin, se propone analizar la problemática con un prototipo a escala que implementa un sistema de adquisición de datos por medio de sensores relacionados con las variables elementales del proceso —principalmente nivel y caudal— integrando un protocolo de comunicación, una interfaz de usuario y el control de diversos actuadores.

Los resultados obtenidos demuestran que la calidad de la respuesta del controlador no depende fuertemente del modelo matemático simulado. En contraste, la respuesta del prototipo se limita a la exactitud de los sensores con los que se registran las mediciones de la variable a controlar.

Finalmente, se comprueba que se podría llevar a cabo una futura implementación del sistema en la finca San José teniendo en cuenta sensores y actuadores pertinentes a la magnitud de la instalación.

Palabras clave: Control, nivel, caudal, sensores, linealización, IoT.

Abstract

The project focuses on the pressing issue faced in areas where water supply is a daily challenge due to time and travel constraints between communities. Its core approach is the facilitation of informed decision-making through the acquisition and visualization of data related to storage and distribution.

Consequently, the technical solution involves the implementation of a scaled-down prototype that features a data acquisition system. This system utilizes sensors for measuring the process's critical variables—primarily level and flow rate—while integrating a communication protocol, a user interface (UI), and the control of various actuators.

The results obtained demonstrate that the quality of the controller's response does not strongly depend on the simulated mathematical model. In contrast, the response of the prototype is limited by the accuracy of the sensors used to record the measurements of the controlled variable.

Finally, it is verified that a future implementation of the system could be carried out at the San José farm, considering sensors and actuators appropriate to the scale of the installation.

Keywords: Control, level, flow rate, sensors, linearization, IoT.

Lista de Imágenes

Imagen 1. Entorno de SketchUp. Tomado de [25]. 25
Imagen 2. Logo MATLAB. Tomado de [48]. 31
Imagen 3. Microcontrolador ESP32. Tomado de [51]. 32
Imagen 4. Logo ARDUINO. Tomado de [53]. 33
Imagen 5. Actuador electromecánico. Tomado de [57]. 36
Imagen 6. Sensor HC-SR04. Tomado de [69]. 53
Imagen 7. Montaje experimental con sensor HC-SR04 y medidor laser DLR130. Autoría propia. 54
Imagen 8. Sensor YF-S201. Tomado de [71]. 58
Imagen 9. Montaje experimental con sensor YF-S201. Autoría propia. 59
Imagen 10. Montaje experimental con servo-válvula y transportador. Autoría propia. 61
Imagen 11. Código de estimación de tf del actuador. Autoría propia. 62
Imagen 12. Diseño de circuito - Nivel. Autoría propia. 63
Imagen 13. Diseño de circuito - Caudal. Autoría propia. 64
Imagen 14. Diseño de circuito - Actuadores. Autoría propia. 64
Imagen 15. Prototipo a escala. Autoría propia. 70

Lista de Figuras

Figura 1. Estructura del controlador PID. Autoría propia. 26
Figura 2. Respuesta del controlador PID. Tomado de [31]. 27
Figura 3. Estructura del controlador MPC. Tomado de [36]. 27
Figura 4. Estructura de controlador de FL. Tomado de [36]. 28
Figura 5. Estructura de controlador IMC. Tomado de [42]. 29
Figura 6. Medición de nivel con electrodos. Tomada de [54]. 34
Figura 7. Medición de caudal con turbina. Tomada de [55]. 35
Figura 8. Metodología del proyecto. Autoría propia. 39
Figura 9. Diagrama de conexión del prototipo. Autoría propia. 49
Figura 10. Arquitectura de tareas del ESP32 - NIVEL. Autoría propia. 66
Figura 11. Arquitectura de tareas del ESP32 - CAUDAL. Autoría propia. 66
Figura 12. Arquitectura de tareas del ESP32 - ACTUADORES. Autoría propia. 67

Lista de Tablas

Tabla 1. Matriz de Pugh para selección de Modelo. Autoría propia. 48
Tabla 2. Matriz de Pugh de Técnicas de Control. Autoría propia..... 50
Tabla 3. Matriz de Pugh de sensor de nivel. Autoría propia..... 52
Tabla 4. Exactitud de dispositivos de medición de distancia. Autoría propia. 55
Tabla 5. Matriz de Pugh de sensor de caudal. Autoría propia. 57
Tabla 6. Exactitud de dispositivos de caudal. Autoría propia..... 60
Tabla 8. Tabla de verdad de los MUX / DEMUX 74HC4052. Autoría propia..... 63

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Interfaz IoT. Tomado de [61]. 37
Ilustración 2. Modelo del sistema Paralelo. Autoría propia. 40
Ilustración 3. Modelo del sistema Serie. Autoría propia. 41
Ilustración 4. Modelo del sistema Mixto. Autoría propia. 41

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Simulación de respuesta al escalón de los modelos matemáticos. Autoría propia. 48
Gráfica 2. Distancia de referencia vs Duración de pulso. Autoría propia. 54
Gráfica 3. Distancia de referencia vs Distancia medida y estimada. Autoría propia. 55
Gráfica 4. Peso [kg/s] vs Cantidad de Pulsos. Autoría propia. 59
Gráfica 5. Peso [kg] vs Volumen medido y estimado [L]. Autoría propia. 60
Gráfica 6. Respuesta al escalón en lazo abierto y cerrado. Autoría propia. 69

Glosario de Abreviaciones

- FL: Lógica Difusa
- IMC: Control basado en Modelo Interno
- IoT: Internet de las cosas
- LTI: Lineales e Invariantes en el Tiempo
- MPC: Control Predictivo basado en Modelo
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- ONU: Organización de las Naciones Unidas
- PIB: Producto Interno Bruto
- PID: Proporcional-Integral-Derivativo
- POT: Plan de Ordenamiento Territorial
- PWM: Modulación por ancho de pulso
- tf: Función de transferencia
- UI: Interfaz de usuario
- WEF: Foro Económico Mundial
- ZN: Ziegler-Nichols
- MQTT: Message Queuing Telemetry Transport

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En mediaciones del área metropolitana de la ciudad de Bogotá y el municipio de Cota, se encuentra la finca San José; esta finca cuenta con 10,9 hectáreas que están distribuidas para fines agrícolas y recreativos.

Este lugar es visitado con regularidad por parte de comunidades religiosas, estudiantes de colegios y por personas naturales que requieren de las instalaciones del lugar para realizar diferentes eventos; la finca cuenta con 20 personas de dedicación completa en procesos de mantenimiento, construcción y adecuación de nuevos espacios para las diferentes celebraciones; sin embargo, el promedio por mes de las personas participantes de las diferentes jornadas, es de alrededor de 600, considerando los picos momentáneos que se pueden presentar en el año debido a diferentes ceremonias; a causa de la cantidad de personas que ocupan el lugar, no siempre está disponible el servicio de agua por diferentes factores que pueden afectar la recolección en esta zona; por lo que la necesidad de abastecer de agua la finca en momentos en los que hay mayor afluencia se hace fundamental para asegurar un suministro constante y garantizarle a los trabajadores y visitantes un servicio de agua digno. La finca San José, como muchas otras edificaciones en la zona, carecen del servicio de acueducto [1], por lo que los habitantes, trabajadores y visitantes deben atravesar vías de difícil acceso para suplir sus necesidades con respecto al recurso hídrico. Adicionalmente, a causa de su ubicación en el área periurbana, el tiempo del desplazamiento desde la zona rural hacia la estación de Transmilenio se llega a incrementar hasta 3 veces su tiempo mínimo de desplazamiento en la mañana; así como la duración del mismo trayecto en horas de la tarde o noche desde la ciudad hacia el municipio, y esto se debe a que se realizan más de 700 viajes entre el municipio de Cota y la ciudad, ocasionando una baja disponibilidad del recurso hídrico [2].

En busca de una solución, los habitantes del lugar diseñaron un sistema de captación de aguas subterráneas que almacena alrededor de $60m^3$ considerando la proximidad del terreno al río Bogotá. Por ello es fundamental encontrar una solución a esta situación para garantizar el acceso constante al agua, especialmente en los momentos de mayor afluencia, y poder mejorar el uso de este recurso vital. Sin una solución adecuada, las operaciones de la finca seguirán enfrentando dificultades y limitaciones que afectarán su funcionamiento, así como la experiencia de los visitantes y la calidad de vida de los trabajadores. A partir de lo planteado anteriormente surge la siguiente pregunta problema:

¿Qué sistema electrónico de control de nivel y caudal de agua con monitoreo de variables podría ser implementado en la finca San José, basándose en un modelo a escala para el almacenamiento y distribución del recurso hídrico?

1.2 Objetivos

1.2.1.1 General

Implementar un prototipo electrónico de control de nivel y caudal de agua con monitoreo de variables para el modelo a escala 1:50 de la planta existente en la finca San José del municipio de Cota.

1.2.1.2 Específicos

- Determinar la dinámica del sistema a través de un modelo matemático y su correspondiente simulación para la selección de la técnica de control.

- Diseñar un sistema de control para la regulación del nivel y caudal en los tanques del prototipo mediante la integración de sensores y actuadores que permitan aplicar la técnica de control seleccionada.

- Verificar el control de nivel y caudal de agua mediante el cumplimiento del set-point de las variables y el tiempo de respuesta del sistema.

1.3 Justificación

El agua, en términos biológicos, es un elemento vital para los seres humanos; sin embargo, con el transcurso del tiempo, el ser humano ha encontrado diversas maneras de emplear este líquido. El manejo del agua en entornos agrícolas, domésticos, urbanos, o industriales implican no solo su uso sino también el consumo de este recurso; por otro lado, está su aplicación no consuntiva, que implica no consumir el recurso, pero si la utilización de él con el fin de suplir la demanda energética, transportar personas y mercancías, mantener el equilibrio ecológico o para usos recreativos, según sea el caso. [3]

Según el artículo 435 del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), los hogares rurales que estén ubicados en las lejanías de los territorios urbanos y no tengan acceso al servicio de acueducto podrán optar por usar diferentes puntos de suministro u otras alternativas para abastecerse del servicio hídrico; de la misma forma, explican que si se llevan a cabo alternativas para el abastecimiento de agua, el tratamiento de esta debe seguir la normativa estipulada y la Autoridad Sanitaria se hará cargo de la potabilización. [1]

Para el año 2023 el acceso al agua potable fue restringido, según datos del ministerio de Vivienda, solo el 7 % de los hogares colombianos accedieron al servicio de agua potable, mientras que, a 12 millones de personas, que representan el 25 % de la población, no se les garantizó el acceso al líquido de manera adecuada [4]. De la misma manera, al menos 3,2 millones de personas no tienen acceso a la prestación del servicio de agua en zonas rurales [5], lo que genera no solo una baja calidad de vida para los afectados sino manejo ineficiente de la productividad del agua y por consiguiente una afectación en la economía de los hogares, negocios y demás zonas rurales afectadas.

Durante los primeros meses del año 2024 en la ciudad de Bogotá comenzó un desabastecimiento de agua en los embalses que suplen a la capital y sus municipios aledaños; debido a ello las autoridades decretaron medidas de racionamiento de agua para mantener un balance a favor de los embalses mientras se superan los estragos del paso del fenómeno del Niño. [6] En ese contexto, la Organización Mundial de la Salud (OMS), por medio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), aclara que para cubrir las necesidades básicas de una persona se requieren entre 50 y 100 litros diarios por persona; los cuales deben ser distribuidos entre aseo y alimentación. [7]

Gracias a la infraestructura de la planta de almacenamiento de agua que dispone la finca San José se promueve el desarrollo de proyectos relacionados con el almacenamiento de agua para riego y saneamiento; de acuerdo a ello, se busca dar una solución a la problemática con la implementación de un prototipo de control electrónico que tome en cuenta una escala de

la capacidad del sistema de almacenamiento para brindarle a los administradores de la edificación una manera con la cuál puedan disponer del líquido en momentos necesarios.

1.4 Impacto Social

Desde el desarrollo de la constitución de 1991, se plantea que todos los ciudadanos de nacionalidad colombiana tengan derecho al acceso del recurso hídrico, por lo tanto, el uso de plantas de tratamientos de agua es indispensable para el cumplimiento del artículo 49 y el artículo 366 [8]. A pesar de esto, las comunidades más alejadas de las áreas urbanas, e incluso las poblaciones periurbanas, no tienen un acceso constante a este servicio y las pocas que lo tienen no se les garantiza que el suministro sea constante. Adicionalmente, según el Foro Económico Mundial (WEF), la crisis por el desabastecimiento de agua a las comunidades para sus diferentes actividades en conjunto con el cambio climático han alterado el ciclo del agua por lo que la búsqueda de alternativas sostenibles para la recolección y distribución moderada de este recurso se hace una prioridad para los próximos años ya que además de contribuir en el desarrollo sostenible de las comunidades, puede beneficiar a la economía de estas en virtud del PIB para el año 2050; lo que representaría ganancias regionales entre el 2 % y el 10 % considerando la implementación de políticas para la gestión del recurso hídrico. [9]

Este proyecto, que se centra en la implementación de un prototipo de control de nivel y caudal de agua con monitoreo de variables, tiene como finalidad ofrecer una solución modelada a escala de la planta existente en la finca San José. Aunque no se implementará directamente en la finca, el prototipo busca analizar y simular las condiciones del manejo del agua en el sitio para identificar posibles soluciones. En la finca se requiere el uso constante de agua para actividades esenciales relacionadas con el bienestar y la higiene de los habitantes, trabajadores y visitantes por lo que su desarrollo contribuye a las metas planteadas en los objetivos de desarrollo sostenible. [10]

Primero, el proyecto favorece al objetivo número 6 gracias a que promueve la sostenibilidad de extracción y abastecimiento como se indica en la cuarta meta de este mismo. [11] Adicionalmente, respecto al ODS 9 que abarca la industria, innovación e infraestructura, el proyecto puede aportar significativamente a la cuarta meta que está enfocada en construir infraestructuras que promuevan el uso eficiente de los recursos. [12] Por último, en cuanto al ODS 12, y su enfoque general de producir y consumir responsablemente, el proyecto lo favorece gracias a que fomenta el almacenamiento y consumo racional del agua. [13]

De igual forma, este proyecto tiene un impacto positivo en la facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás debido a que a partir de este se facilita la posibilidad de llevar a cabo más desarrollos enfocados en el manejo de fluidos teniendo en cuenta problemáticas relacionadas con las temáticas de investigación de la Facultad, especialmente las vinculadas con el grupo MEM, más precisamente la línea de automática.

2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se plantean una revisión bibliográfica sobre las temáticas que aportan al desarrollo de este proyecto.

2.1 Medición y Monitoreo de nivel en sistemas de almacenamiento de agua

La medición de nivel es el punto de partida para cualquier estrategia de control en sistemas de almacenamiento de agua, ya que determina la cantidad útil disponible en los tanques, previene sobrellenados y garantiza la alimentación adecuada de las redes de distribución. En [14] se presenta una clasificación general de tecnologías de medición de nivel empleadas en la industria de procesos, marcando la diferencia entre sensores de contacto y sensores sin contacto, justificando el uso de sensores de ultrasonido para minimizar el mantenimiento debido al acceso a los contenedores de almacenamiento y evitar el contacto con el líquido.

Por otro lado, [15] describe el diseño e implementación de un prototipo de control de nivel y caudal a partir de la integración de un sensor de presión que entrega una señal que se procesa para indicar al controlador el valor de la variable con el fin de mantener la altura específica en un tanque de almacenamiento expuesto a perturbaciones en la entrada y la salida.

Por último, en [16] hace uso de un sensor ultrasónico para determinar la cantidad de agua disponible en un contenedor, así como tomar los valores de la medición para la apertura o cierre de una compuerta. Sin embargo, se menciona que la medición del sensor HC-SR04 no es totalmente precisa a comparación con un instrumento de medición calibrado.

2.2 Medición de caudal en redes de distribución de agua

Según lo explicado en [14], existen diversos tipos de medidores capaces de medir el flujo que pasa por una tubería por medio de técnicas relacionadas a los fenómenos electromagnéticos, de presión diferencial o velocidad.

En [17] se sintetiza el análisis de medidores de flujo, profundizando los criterios clave para elegir un tipo específico de medidor. Además, resaltan que la selección de medidores de caudal se realiza a partir de las propiedades físicas y químicas del líquido. De igual manera, en [18] se selecciona un sensor de caudal a partir de un método de decisión de múltiples criterios como costo, capacidad de medición y material de construcción, con esta evaluación determinan que el sensor YF-S201 es la opción adecuada para la medición de caudales en tuberías de media pulgada para líneas de reparto y distribución de agua.

2.3 Control de nivel y caudal en sistemas de almacenamiento y distribución

En [19] se comparan técnicas de control tradicionales como PID y FL para regular el nivel en un sistema de tanques acoplados con líquidos no viscosos y concluyen que para cumplir una referencia deseada, el controlador con FL presenta un mejor desempeño, sin embargo, se evidencia que el controlador PID tiene mejor respuesta ante perturbaciones.

El desarrollo de [20] señala como la complejidad de un sistema de tanques que considera la geometría irregular de los contenedores, tiempos muertos y las restricciones operativas del sistema impactan en el comportamiento de un controlador PI para la aplicación de un control de nivel en un sistema de almacenamiento de agua.

En otro contexto, el proyecto que desarrollan en [21] busca una solución para la distribución que requiere la comunidad de Tamil Nadul, para lograrlo se emplearon sensores de nivel, caudal; en base a los datos recolectados por los sensores y analizados por una unidad de procesamiento, se realiza un control PID para el accionamiento de una válvula que da paso a la distribución del líquido y evita el desperdicio del mismo a causa de una referencia de nivel que no se puede superar.

Por otro lado, según lo relacionado con [22], el 90 % de los controladores usados en la industria para el control de nivel en tanques son del tipo PID, sin embargo, la regulación de nivel en tanques cónicos con este tipo se vuelve complicada debido a su relación no lineal, basado en eso, se considera ajustar el control PID por medio de lógica difusa; el resultado de esto es un sistema con un tiempo de establecimiento y sobre paso reducidos comparados con lo obtenido con un PID típico.

Finalmente, en [23] emplean el uso de sensores de flujo en conjunto con actuadores para regular el paso de caudal de agua entre dos contenedores para asegurar la operación del sistema en rangos especificados por los administradores del sistema mediante el análisis de datos y la activación de alarmas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Sketch Up

Es una plataforma de uso libre que permite crear piezas tridimensionales basado en las caras de esta misma, se usa principalmente para visualizar proyectos de diseño, planeación urbana e ingeniería. Cuenta con diseños propios y desarrollados por la comunidad, los cuales facilitan el modelado de piezas con objetos convencionales y específicos. [24]

Por medio de esta plataforma, se diseña en tres dimensiones la representación a escala del sistema de tanques interconectados con base a los contenedores reales.

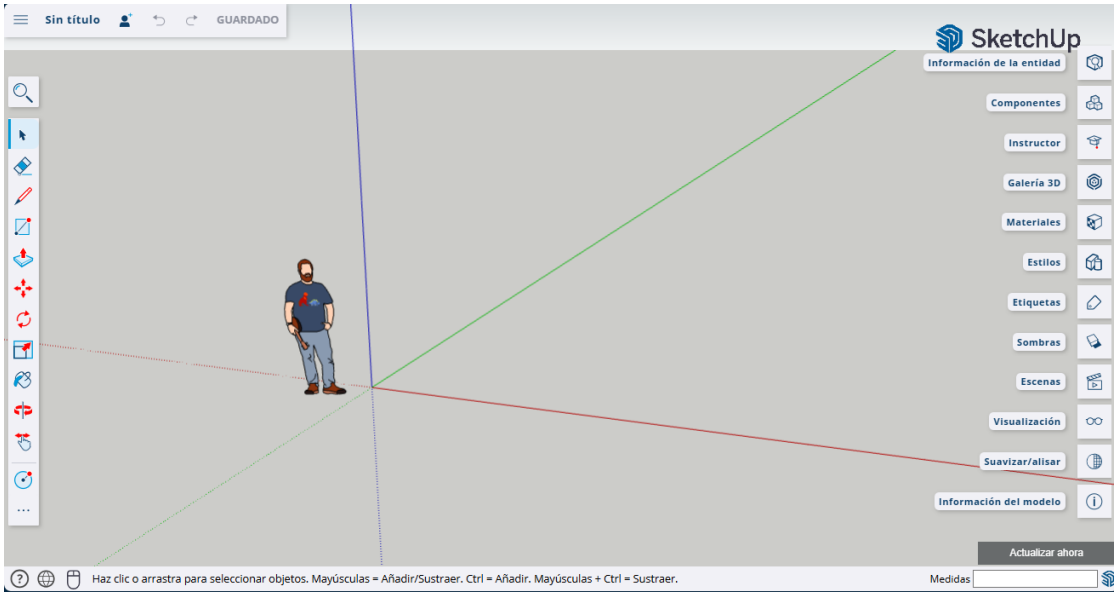


Imagen 1. Entorno de SketchUp. Tomado de *[25]*.

3.2 Controlador

En [26] se define controlador a un dispositivo o un conjunto de dispositivos capaces de regular el comportamiento de la dinámica de un sistema de acuerdo a una referencia deseada a partir de la disminución de la diferencia existente entre la variable a controlar y la referencia.

El control de procesos dinámicos en la industria es gestionado por diferentes tipos de controladores electrónicos que ofrecen una mayor eficacia en comparación con las acciones realizadas por los operarios. Entre los controladores más usados se encuentran el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), Control Predictivo basado en Modelo (MPC), el

control por Lógica Difusa (FL) y el Control basado en Modelo Interno (IMC) [27] [28]. Entre los tipos de controladores descritos en [26], [29] y [30] se encuentran:

3.2.1.1 PID

Este tipo de controlador es el más usado en la industria, se diferencia de los demás por su versatilidad para controlar diferentes variables y los diferentes métodos de sintonización que se pueden usar. Los controladores PID están compuestos por tres acciones de control:

- Proporcional: Minimiza el error del sistema; cuando el error es grande, la acción de control proporcional también lo es. Esta acción aumenta la velocidad de respuesta, disminuye el error del sistema en estado estacionario y aumenta la inestabilidad del sistema.

- Integral: Elimina el error en estado estacionario del sistema mientras que se reduce la estabilidad y el sobre pico aumenta.

- Derivativa: Le da más estabilidad al sistema, disminuye el sobre pico y aumenta la velocidad.

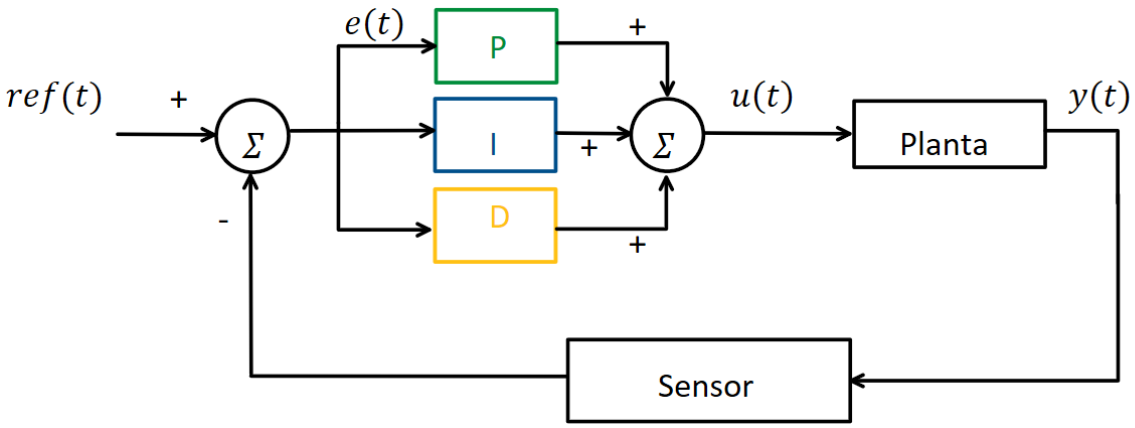


Figura 1. Estructura del controlador PID. Autoría propia.

En conjunto, estas tres acciones comprenden al controlador PID y cada una aporta características favorables al sistema en general; esperando mejorar la estabilidad, disminuir el sobre pico, aumentar la velocidad y eliminar el error de estado estacionario del proceso como se observa en la Figura 2.

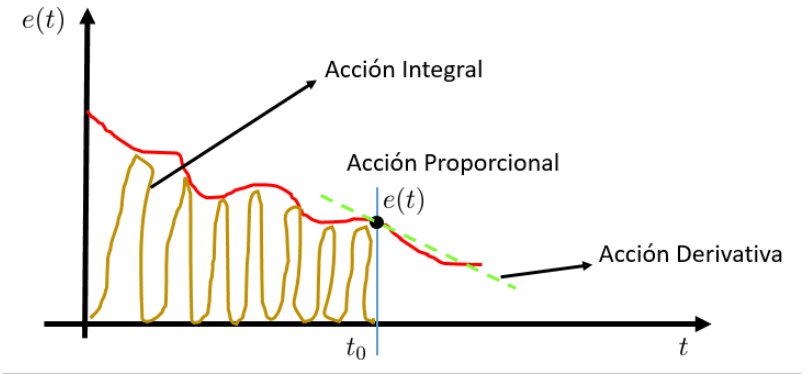


Figura 2. Respuesta del controlador PID. Tomado de *[31]*.

En [32] usan la sintonización de Z-N para obtener los valores de las constantes del controlador con el fin de regular la tensión suministrada a los actuadores presentes en el esquema de control de nivel.

Por otro lado, [33] presenta el control de un sistema de tanques interconectados con diversas estrategias que comparan sus características y resulta en un mejor desempeño del PID contra un controlador IMC respecto al tiempo de establecimiento y el sobrepaso.

Finalmente, [34] hace referencia al poco mantenimiento y a la robustez que el controlador posee frente a otros tipos de controladores más robustos.

3.2.1.2 MPC

Los controladores MPC, desarrollados en [35] son controladores avanzados que siguen con fidelidad el set-point establecido en cada instante de tiempo. A pesar de su robustez y efectividad para el sistema que se diseñó, se debe tener en cuenta la complejidad de estos debido a la función de optimización que busca minimizar.

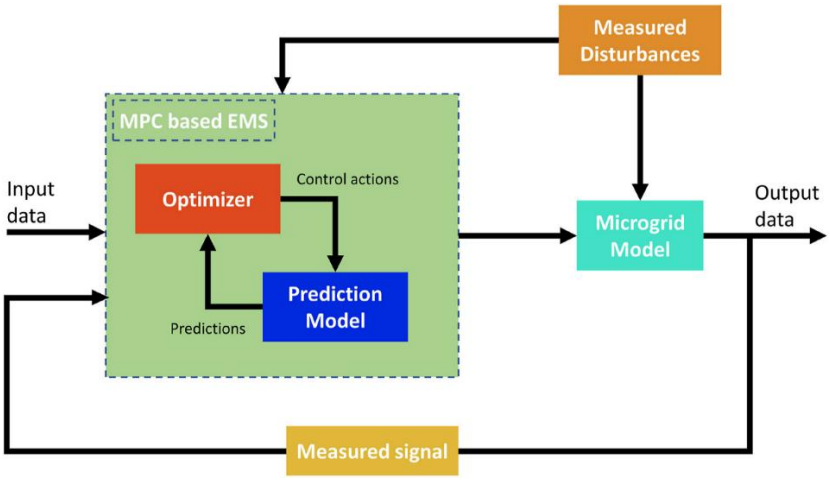


Figura 3. Estructura del controlador MPC. Tomado de *[36]*.

Mientras que el PID se puede ajustar de manera empírica, el MPC depende de la identificación precisa del sistema para obtener un modelo más preciso que sea capaz de mantener su predicción mientras rechaza las perturbaciones. [37]

En cuanto a la comparación entre PID y MPC que se realiza en [38], se evidencia que, para un sistema de nivel, el controlador MRAC (Modelo Robusto de Control Adaptativo) presenta un sobrepaso nulo. Sin embargo, la respuesta del tiempo de establecimiento y el tiempo de subida cuando se implementa un PID presenta una variación significativa con respecto a la presentada por el MRAC. Esto indica que el mejor controlador para un sistema puede depender del comportamiento que se desea del sistema.

3.2.1.3 FUZZY LOGIC

La lógica de control difuso consiste en reglas que determinan el comportamiento del sistema.

Como se evidencia en la Figura 4, el diseñador del controlador define los rangos en los que debe operar el proceso para obtener un buen desempeño; así mismo, se recalcula la salida del controlador a partir de una señal de error obtenida entre la referencia y la salida.

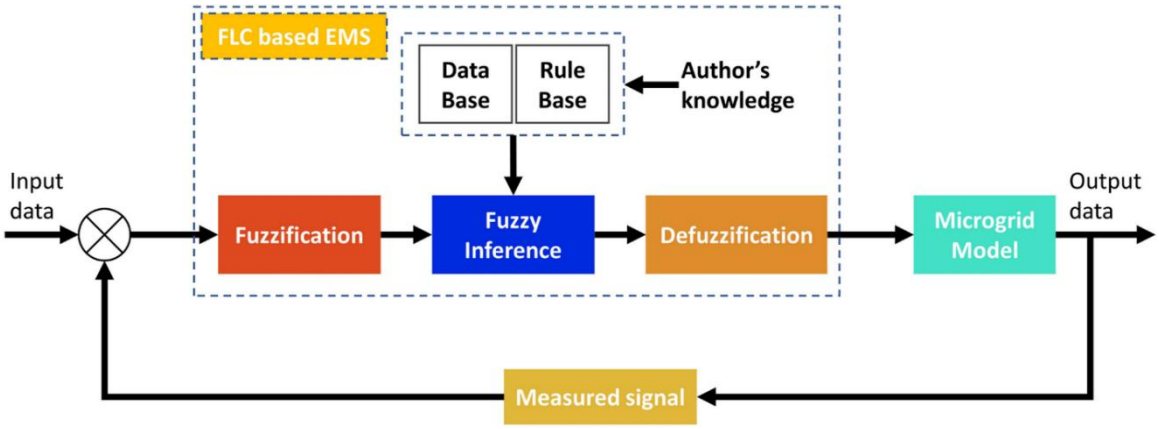


Figura 4. Estructura de controlador de FL. Tomado de *[36]*.

En el control de flujo constante de agua que presenta [39] se implementa un controlador PID que obtiene el valor de sus constantes a través de un controlador de FL; estas constantes varían con el tiempo, lo que hace que este modelo tenga un sobrepaso menor al que tiene el PID tradicional al igual que un tiempo de establecimiento menor.

Además de lo anterior, los controladores realizados con lógica difusa no requieren de un modelo matemático ya que las reglas simplifican el funcionamiento del sistema. Como

se menciona en [40] el algoritmo de control difuso requiere de una cantidad de variables significativa ya que de ello depende la calidad del control, por ello, el costo computacional comparado con el PID es más alto.

3.2.1.4 IMC

De acuerdo a [41] el controlador IMC tiene como finalidad obtener un modelo matemático preciso que se incluye a la estructura del proceso con el fin de prevenir las perturbaciones en un solo paso de tiempo futuro lo cual lo diferencia del MPC que posee un horizonte de predicción más amplio. Asimismo, se presentan resultados que no difieren en grandes cantidades con respecto a un controlador PID para el sistema de tanques acoplados.

En la Figura 5 se observa la estructura general del controlador IMC, este está compuesto por un filtro de peso W en el que se da más relevancia a unas frecuencias que a otras, dos plantas: G y $\hat{G}$, la primera es el sistema dinámico sobre el cual actúa el controlador, mientras que la segunda es un modelo matemático preciso del proceso; la salida de ambas plantas conforman un error de predicción que junto a la referencia proporcionada, generan el error del sistema físico.

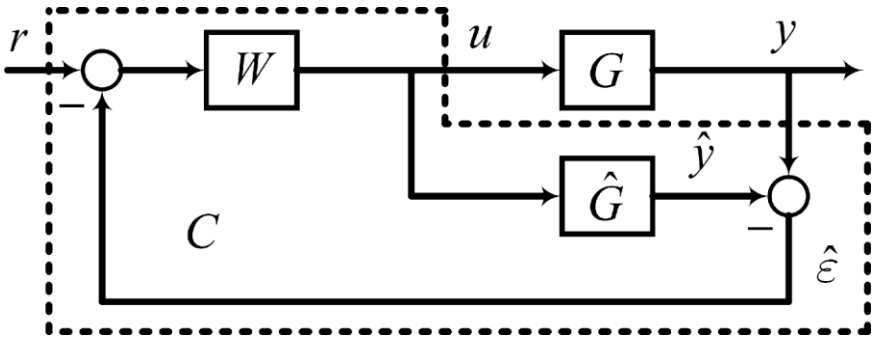


Figura 5. Estructura de controlador IMC. Tomado de *[42]*.

Estas estrategias permiten realizar una evaluación para determinar la técnica de control pertinente mediante la comparación de sus características intrínsecas con el fin de ser utilizada para el desarrollo del control de nivel.

3.3 Métodos de sintonización

Son mecanismos estratégicos de índole heurístico, matemático o computacional que permiten calcular las constantes adecuadas para obtener un mejor desempeño de la planta de acuerdo a sus especificaciones y asegurando la estabilidad y seguridad del sistema.

3.3.1.1 Ziegler-Nichols

Es un método heurístico matemático desarrollado por Ziegler y Nichols que es empleado ampliamente en la industria para el manejo de sistemas en lazo abierto y lazo cerrado utilizando controladores de tipo P, PI o PID de acuerdo al tipo de respuesta requerida. Este método de sintonía considera el retraso de la respuesta con respecto a la excitación del sistema (L), el tiempo asociado al punto de inflexión de la curva de respuesta del sistema (T) y el valor de referencia para su estabilidad; a partir de estos se logran calcular los coeficientes relacionados al tipo de controlador de su elección. [43]

El método de sintonización permite conocer la dinámica de los sistemas evaluados ante una entrada de tipo escalón para observar su comportamiento y su tiempo de estabilización.

3.4 Digitalización

Es el proceso de transformar una señal continua en el tiempo a una secuencia de puntos discretos que son retenidos durante un periodo de muestreo con el fin de que un microcontrolador dedicado pueda adquirir la señal, procesarla y ejecutar acciones de acuerdo a esta. Esto es fundamental ya que permite diseñar sistemas de control en tiempo discreto capaces de representar con exactitud los sistemas en tiempo continuo manteniendo su funcionalidad siempre y cuando se respeten los criterios de muestreo evitando la pérdida de datos.

3.4.1.1 Retenedor de Orden Cero (ZOH)

Es el método más sencillo con el que se procesa el muestreo de una señal analógica y consiste en retener el valor de una muestra hasta la siguiente, según el tiempo de muestreo. [44]

$$G(z) = \frac{z-1}{z} Z\left\{\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{G(s)}{s}\right\}\right\} \tag{1}$$

3.4.1.2 Transformación bilineal (Tustin)

Es un método que implica la transformación del plano *'s'* al plano *'z'* de tal manera que para preservar la estabilidad y las características frecuenciales asociadas al sistema, se debe considerar el periodo de muestreo como base para esta transformación. [45]

$$G(z) = G(s)|_{s=\left(\frac{2}{T}\right)\left(\frac{z-1}{z+1}\right)} \quad (2)$$

El uso de estrategias de digitalización permite incluir un control digital en la herramienta de procesamiento de acuerdo a la transformación de los parámetros de tiempo continuo a tiempo discreto.

3.5 Matriz de Pugh

Es una herramienta utilizada para la toma de decisiones informadas con la que se evalúan los criterios de un conjunto de opciones con base en criterios de una opción predefinida. Esto permite seleccionar la alternativa que satisface los aspectos técnicos y económicos de un proyecto. [46]

El concepto de referencia se evalúa como '0'; aquellas opciones que superan al concepto de referencia en algún criterio se valoran con un '1', mientras que las menos beneficiosas se califican como '-1'. Esto se hace con el fin de evaluar de forma sistemática y comparativa diversos conceptos preliminares frente a un concepto base.

En el desarrollo de este proyecto, este tipo de matriz permite evaluar de manera comparativa dos o más opciones frente a un concepto de referencia mediante la calificación de varios criterios que tienen en común dando como resultado el modelo, tipo de técnica de control y sensores seleccionados.

3.6 MATLAB

Es un entorno de programación y cálculo numérico ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias. Su capacidad para manipular matrices y su amplia gama de herramientas especializadas lo hacen esencial para el desarrollo de modelos matemáticos, análisis de datos y simulación de sistemas complejos. [47]

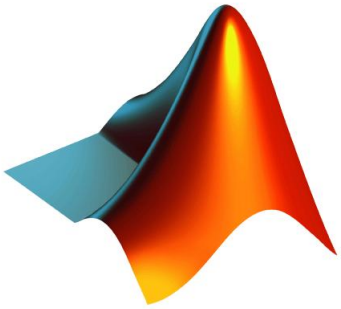


Imagen 2. Logo MATLAB. Tomado de *[48]*.

Este entorno se utiliza para realizar la estimación del actuador en conjunto con la parte mecánica que permite el paso de flujo entre los contenedores; asimismo, se emplea para visualizar el comportamiento dinámico de cada uno de los modelos matemáticos y calcular los parámetros del controlador seleccionado.

3.7 System Identificiation Toolbox

Es un toolbox de MATLAB que permite realizar aproximaciones matemáticas como función de transferencia, modelos de procesos, espacios de estados, entre otros, sobre fenómenos, sistemas u objetos. Las aproximaciones se pueden dar en un dominio diferente al dominio de origen y son estimadas a partir de un conjunto de datos. [49]

Esta herramienta del entorno de MATLAB se aplica para la identificación matemática del actuador de acuerdo a un conjunto de datos que compara la señal de entrada con la posición final del mismo.

3.8 Microcontrolador

Son dispositivos electrónicos usados como central de procesamiento para diversas tareas que cuentan con periféricos capaces de recibir señales que son captadas por medio de componentes sensibles a variables externas, tomar decisiones, controlar actuadores, y controlar el flujo de datos y las acciones de un dispositivo. [50]

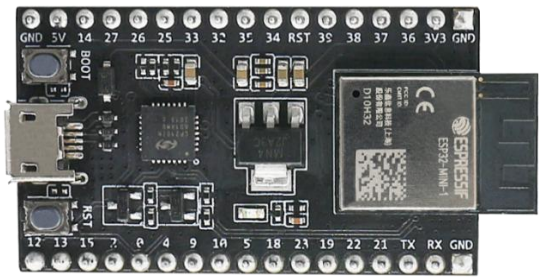


Imagen 3. Microcontrolador ESP32. Tomado de *[51]*.

En el desarrollo de este proyecto se usan dos diferentes microcontroladores ESP32 para realizar las mediciones de cada una de las variables inherentes al sistema; adicionalmente, se implementa un tercer microcontrolador que se encarga de implementar la técnica de control seleccionada y el accionamiento del equipo de bombeo.

3.9 ARDUINO

Es un conjunto de herramientas para el desarrollo de aplicaciones electrónicas basadas en la programación de microcontroladores compatibles con lenguaje C y C++. Es usado para proyectos a escala que involucren la interacción entre usuario, el sistema y la interfaz de control. [52]



Imagen 4. Logo ARDUINO. Tomado de *[53]*.

Esta herramienta facilita la programación de los microcontroladores para que realicen diversas tareas como mediciones; suscripción y publicación de datos en el servidor local, y procesos de control.

3.10 Medidores de nivel

Es una técnica que se realiza en la industria para mantener el funcionamiento correcto de un proceso, así como el balance de materia prima en la industria. Para medición de nivel de líquidos se emplean instrumentos para medición directa, basados en presión hidrostática, basados en características eléctricas o por medio de ultrasonido. [14]

- Instrumentos de medición directa: Consiste en una varilla o regla graduada según el nivel deseado que se introduce en un tanque para conocer qué tan lleno está.

- Instrumentos basados en características eléctricas: Consiste en el uso de electrodos y un circuito electrónico que es capaz de percibir si hay conducción eléctrica entre los electrodos sumergidos en el tanque.

- Instrumentos basados en ultrasonido: Se realiza en la emisión y recepción de un pulso ultrasónico a una superficie reflectante; el retardo en la captación luego de que la onda sea emitida, determina el nivel del tanque.

En la Figura 6 se presenta una medición del nivel de dos tanques por medio de electrodos que entran en contacto con el líquido conforme su nivel vaya aumentando.

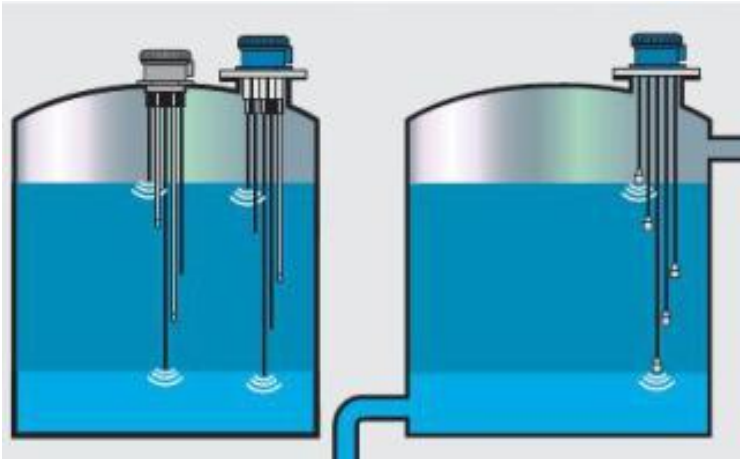


Figura 6. Medición de nivel con electrodos. Tomada de *[54]*.

Los medidores de nivel son parte fundamental de este proyecto, estos se encargan de dar retroalimentación al sistema de control, permitiendo que se realicen las acciones de ajustes necesarias.

3.11 Medidores de caudal

Es una estrategia que se emplea para conocer el volumen de flujo que pasa por una tubería; existen principalmente dos tipos de medidores, los volumétricos y los de caudal de masa. [14] Entre los más relevantes de los medidores volumétricos se encuentran:

- Medidor de codo: Se centra en la fuerza ejercida por el fluido en una tubería de codo en donde se adquiere la medida de presión con una diferencia de 45°; esta diferencia permite deducir el caudal del fluido.

- Medidor de turbina: Tienen un rotor que gira con el paso del fluido y su movimiento induce un campo magnético en una bobina que genera una señal de corriente que puede ser adquirida por un microcontrolador.

- Medidor de placa: Consiste en instalar una placa en el centro de la tubería que es expuesta a la fuerza del fluido. Para traducir la energía con la que el fluido golpea la placa se requiere de un transmisor piezoresistivo.

De los medidores volumétricos mencionados anteriormente, se presenta un medidor de turbina en la Figura 7. Este medidor otorga una señal de pulsos con la cuál se calcula el caudal del fluido.

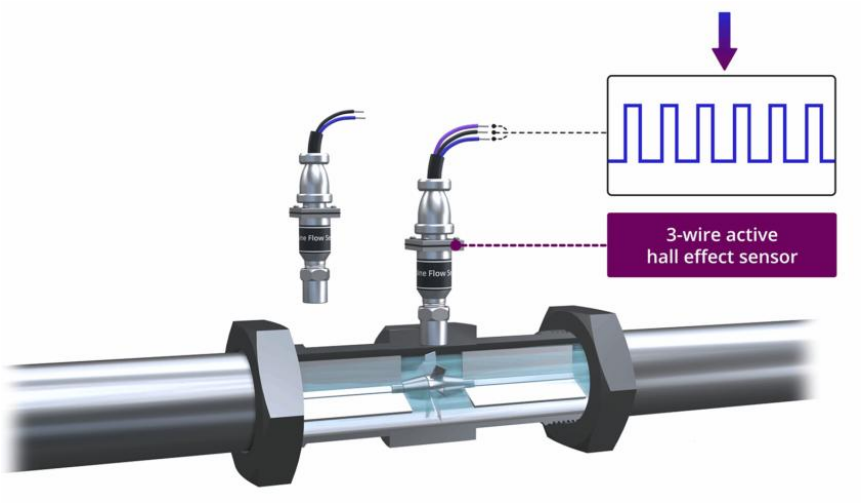


Figura 7. Medición de caudal con turbina. Tomada de *[55]*.

Estos tipos de medidores permiten conocer el volumen de agua que fluye por las tuberías del sistema en un determinado tiempo; en este proyecto se utilizó un sensor de caudal de efecto hall, que entrega pulsos proporcionales al caudal.

3.12 Linealización

Es un proceso que permite transformar la respuesta no lineal de un sensor en una relación lineal a partir de una recalibración. Para ello, se comparan las mediciones del sensor con las de un instrumento de referencia y se aplican técnicas de linealización, como la regresión lineal o logarítmica, para mejorar la precisión y facilitar el procesamiento de los datos. [56]

Con este proceso se realiza la calibración directa e indirecta de los sensores relacionados al sistema, ajustando su curva característica para mejorar la exactitud y el calculo de las variables medidas, garantizando que estas se mantengan en un rango confiable durante la operación.

3.13 Actuadores

Son dispositivos que transforman una señal de energía en un movimiento mecánico para ejecutar una acción determinada.

En el campo de estudio de la ingeniería existen diversos tipos de actuadores, entre ellos están:

- Neumáticos: Se utilizan en sistemas con aire comprimido para llevar a cabo movimientos mecánicos sencillos que requieran una alta velocidad de respuesta.

- Hidráulicos: Emplean fluidos a presión para ejercer una gran fuerza para soportar cargas de trabajo pesadas en maquinaria industrial y de construcción.

- Eléctricos: Transforman una señal eléctrica de control en movimiento rotativo o lineal; son más versátiles y se pueden controlar con mayor precisión.



Imagen 5. Actuador electromecánico. Tomado de *[57]*.

Para este proyecto se emplean actuadores eléctricos capaces de cambiar el ángulo de apertura de los componentes mecánicos que relacionan la referencia asignada a los contenedores que son objeto de control.

3.14 Monitoreo

Es el proceso de supervisión y análisis continuo de las variables que influyen en el comportamiento de un sistema. Este proceso es esencial para identificar variaciones, irregularidades o posibles fallos de manera anticipada, lo que facilita la implementación de medidas correctivas a tiempo. Una de las motivaciones clave para llevar a cabo el monitoreo es el mantenimiento preventivo, asegurando que el sistema opere de forma eficiente y previniendo daños causados por factores externos. [58]

Este proyecto relaciona el monitoreo de variables con los medidores de nivel y caudal con el fin de obtener mediciones en tiempo real y así disponer de información para tomar decisiones frente al almacenamiento de agua.

3.15 FreeRTOS

Es un sistema operativo de tiempo real de código abierto diseñado para microcontroladores. Su ventaja principal es que facilita la gestión de múltiples tareas concurrentes, permitiendo que los núcleos de un procesador ejecuten funciones diferentes de manera paralela. Esto genera un impacto positivo en la pila del procesador debido a que el sistema evita colisiones e interrupciones no deseadas por medio de la asignación de recursos, lo que garantiza que las tareas se ejecuten de manera puntual y sin interferencias. [59]

El sistema operativo FreeRTOS favorece a la organización de las arquitecturas de los códigos ejecutados en cada uno de los microcontroladores al asignar tareas específicas a cada uno de los núcleos garantizando una ejecución más estable.

3.16 Internet de las cosas (IOT)

Es una red de dispositivos físicos capaces de integrar, recopilar y compartir datos de sensores y plataformas a través de la conexión a internet [60]. Por medio del acceso a la red se puede monitorear la información recopilada y procesada por los sensores que tienen dispuestos los microcontroladores desde cualquier otro punto de acceso, lo que permite al usuario del sistema facilitar la toma de decisiones.

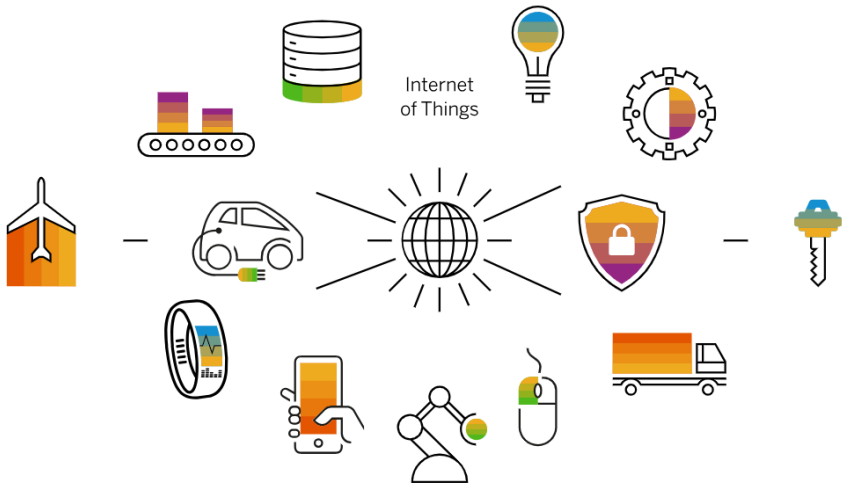


Ilustración 1. Interfaz IoT. Tomado de *[61]*.

La implementación de este proyecto conlleva a la interacción entre microcontroladores a partir del intercambio de información en tiempo real mediante internet usando protocolos de comunicación e interfaces de usuario para la supervisión y control del proceso.

3.17 Protocolos de comunicación

Son un marco de reglas y estándares que definen las características necesarias para la sincronización entre dispositivos electrónicos que buscan intercambiar datos con otros por medio de una red. Estos aseguran la conexión entre sistemas heterogéneos dentro de una arquitectura IoT. [62]

En el proyecto, el protocolo de comunicación entre microcontroladores se emplea para enviar los datos necesarios para la ejecución de la técnica de control en función de las mediciones realizadas en los dispositivos respectivos.

3.18 Plataforma de visualización remota

Son herramientas con arquitectura basada en la nube; que a partir del diseño de una UI permite conocer los valores de variables externas procesadas por dispositivos que cuentan con la capacidad de acceder a una red WiFi y enviar datos a la plataforma. [63]

Dentro de este proyecto, esta herramienta permite que el usuario lleve un control en tiempo real de la medición de los sensores integrados en el sistema, al igual que la asignación de la referencia para los contenedores secundarios.

3.19 Software de diseño electrónico

Son herramientas de desarrollo usadas para la elaboración de esquemas de circuitos electrónicos; que facilitan la distribución de componentes en placas de una o varias capas de material conductor a través de la visualización tridimensional de la PCB. [64]

Haciendo uso de este software se realizan los diseños electrónicos de los circuitos empleados en este proyecto para la medición de nivel, caudal y la activación de actuadores para lograr un correcto funcionamiento del prototipo.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo del proyecto requiere del seguimiento de la metodología planteada en la Figura 8; esta metodología permite relacionar cada fase de forma secuencial, de tal manera que al finalizar el proyecto se corroboren las fases anteriores y permita hacer modificaciones al producto resultante si lo requiere. De acuerdo a esta metodología se plantean las actividades que se pueden observar en el cronograma del proyecto.

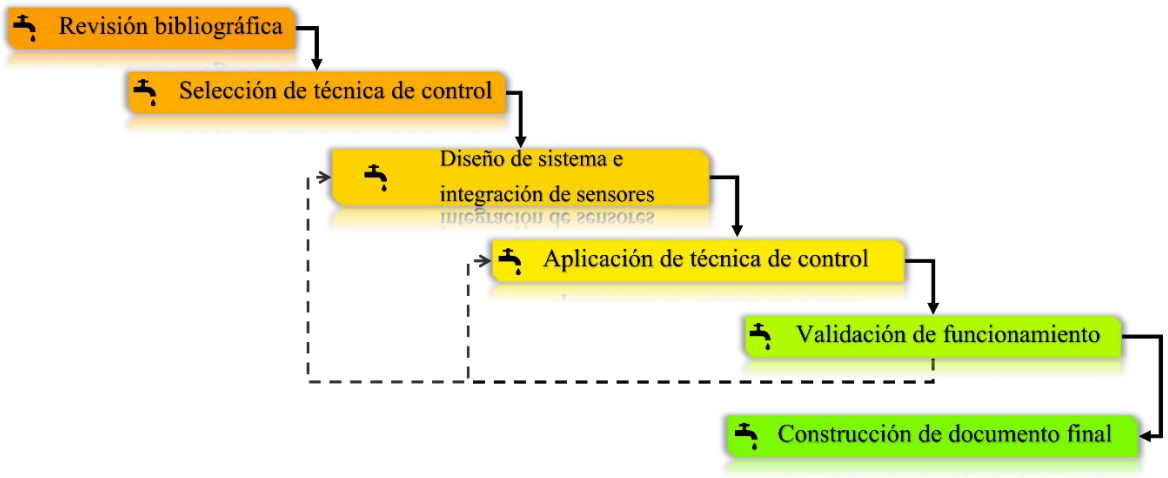


Figura 8. Metodología del proyecto. Autoría propia.

5. DISEÑO DEL SISTEMA

5.1 Modelado del Sistema

En primera instancia, se realizan diversas configuraciones de conexiones entre tanques con el fin de obtener un modelo viable en cuanto a flujo y presión. Para lograrlo, se diseñan tres modelos a escala 1:50 que conserven las capacidades de almacenamiento de la planta dispuesta en la finca San José. De esta manera se identifica el funcionamiento a través de diversas conexiones entre tanques que presenten ventajas en la distribución, almacenamiento del líquido e independencia para efectuar el mantenimiento respectivo. Esta escala permite simular el comportamiento y analizar distintos escenarios con entrada y salida de flujo controlada, sin perder sus características dinámicas.

5.1.1 Modelado 3D

Los modelos se desarrollan en SketchUp para visualizar con claridad la cantidad de tanques y su tipo de conexión. A partir de estos se obtienen los siguientes modelos:

A. Modelo Paralelo

En el primer caso, se emplea un diseño en el cuál todos los tanques de almacenamiento son alimentados con la tubería que proviene desde el tanque de recirculación. Para la salida de este modelo, se juntan los caudales de los tanques de almacenamiento y se direcciona la tubería hacia el tanque de recirculación, adicionalmente se le añade una inclinación a la tubería para que no haya manera de que el agua retorne hacia los tanques de almacenamiento.

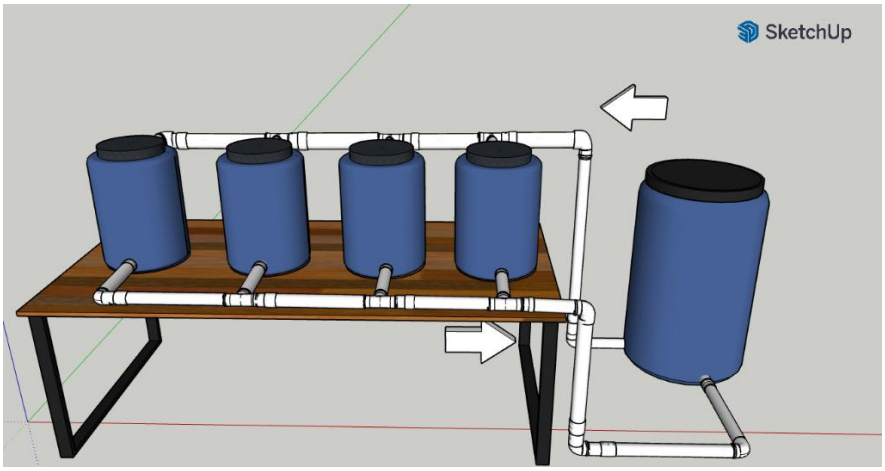


Ilustración 2. Modelo del sistema Paralelo. Autoría propia.

B. Modelo Serie

El segundo modelo realizado tiene una única vía de alimentación proveniente desde el tanque de recirculación hacia el primer tanque de almacenamiento, luego de que este alcanza un nivel mínimo empieza a llenar de manera secuencial los tanques subyacentes. Al igual que el modelo anterior, su salida es en paralelo y realimenta el tanque de reserva para no desperdiciar agua.

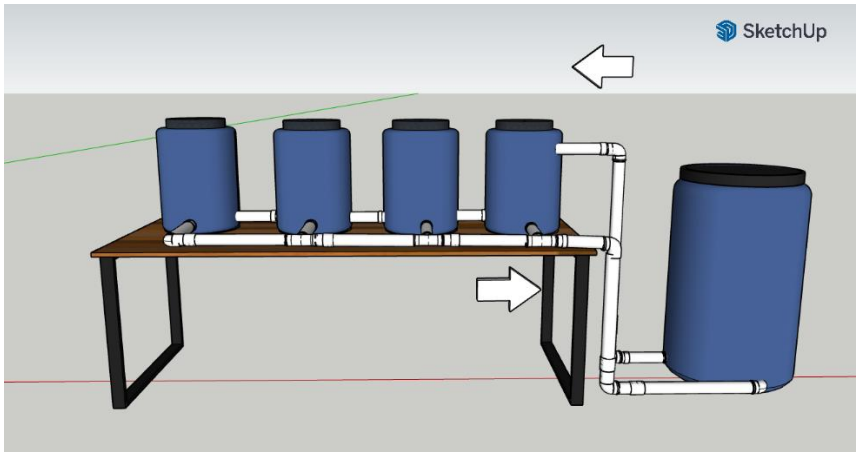


Ilustración 3. Modelo del sistema Serie. Autoría propia.

C. Modelo Mixto

Para el último caso se desarrolla un modelo que combina los descritos previamente, en este se alimentan dos tanques por medio de la tubería principal y los tanques sobrantes se alimentan de manera secuencial a su par principal, así mismo comparten la salida en paralelo.

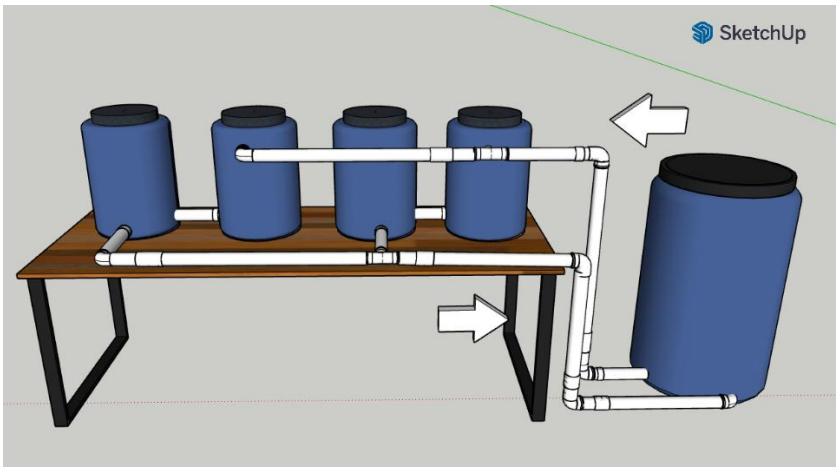


Ilustración 4. Modelo del sistema Mixto. Autoría propia.

Estos modelos son la base para el uso de sensores y actuadores mecánicos, electrónicos y electromecánicos con los cuales se regula el nivel deseado por el usuario en los tanques y se desacoplan en caso de una falla o un mantenimiento.

5.1.2 Representación matemática

Una vez construidos los modelos tridimensionales, se plantea un análisis de la dinámica de estos por medio de su función de transferencia, para ello se tiene en cuenta la ecuación (3) que describe el balance de masas para sistemas hidráulicos; esta ecuación tiene en cuenta que los modelos de tanques poseen parámetros que no cambian en el tiempo, lo que conlleva a modelar matemáticamente sistemas LTI. Esta aproximación es crucial, ya que permite caracterizar el comportamiento de cada sistema de manera simplificada.

$$q_i(t) - q_o(t) = \Delta V(t) \tag{3}$$

Donde:

- $q_i(t)$ es el flujo de entrada en función del tiempo.
- $q_o(t)$ es el flujo de salida en función del tiempo.
- $\Delta V(t)$ es la variación del volumen en un contenedor en función del tiempo.

Teniendo en cuenta que los recipientes son cilíndricos y el volumen tiene relación con la altura que alcanza el líquido, entonces se define la ecuación (4) de la siguiente manera:

$$q_i(t) - q_o(t) = \frac{dV}{dt} \longrightarrow q_i(t) - q_o(t) = A\frac{dh}{dt} \tag{4}$$

Donde:

- A es la sección transversal del contenedor.
- $h(t)$ es la altura del nivel del líquido en función del tiempo.

Además, se tiene en cuenta una resistencia hidráulica ubicada en la salida de los tanques, su comportamiento se describe a continuación en la ecuación (5)

$$R = \frac{\Delta \mathrm{C}}{q_o} \tag{5}$$

En (5) , el término ΔC indica la diferencia de alturas entre tanques.

Por último, al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (4) y (5) se obtienen sus representaciones en el dominio de la frecuencia de acuerdo a la ecuación (6) y (7) respectivamente.

$$Q_i(s) - Q_o(s) = A * s * H(s) \quad (6)$$

$$Q_o(s) = \frac{H(s)}{R} \quad (7)$$

5.1.2.1 Representación matemática del Modelo Paralelo

La función de transferencia del modelo paralelo-paralelo considera un flujo de entrada $\frac{q_i}{4}$ debido a que el flujo total de entrada se divide para los cuatro tanques. Sin embargo, para obtener un modelo general se toma como q_i y se reemplaza (*7*) en (*6*), entonces:

$$Q_i(s) - \left(\frac{H(s)}{R}\right) = A * s * H(s)$$

$$Q_i(s) = H(s)\left((A * s) + \frac{1}{R}\right)$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{A * s + \frac{1}{R}}$$

Finalmente, se obtiene que la función de transferencia que modela la dinámica de un solo tanque es:

$$G_A(s) = \frac{R}{A * R * s + 1} \quad (8)$$

5.1.2.2 Representación matemática del Modelo Serie

La dinámica del modelo serie solo tiene un flujo de entrada q_i; en este caso se consideran cuatro resistencias hidráulicas para separar la dinámica de cada tanque, cada una de estas posee uno de los cuatro flujos de salida, teniendo en cuenta la conexión entre tanques y la salida general del sistema. Este sistema es interactuante, por lo que el nivel de cada tanque va a depender del nivel de los demás. Por consiguiente, se tienen las siguientes generalidades para cada tanque:

$$A_n * s * H_n(s) = q_{n_entrada} - q_{n_salida}$$

Así mismo, se definen los caudales partiendo de la suposición de resistencias de flujo lineal:

$$q_g(t) = \frac{h_1(t) - h_2(t)}{R_1} \; ; q_m(t) = \frac{h_2(t) - h_3(t)}{R_2} \; ; \; q_e(t) = \frac{h_3(t) - h_4(t)}{R_3} \; ;$$

$$q_o(t) = \frac{h_4(t)}{R_4}$$

Dado que el sistema propuesto es de cuarto orden y todos los flujos interactúan entre sí para obtener un nivel deseado en cualquiera de los tanques, se opta por solucionar el sistema de ecuaciones en el dominio de Laplace por medio de Matlab; de esta manera se realiza un código que tiene en cuenta las ecuaciones de cada tanque y las resistencias para obtener la función de transferencia que describa el comportamiento del nivel en cada uno de estos con respecto al flujo de entrada Q_i. El desarrollo de esta función de transferencia se encuentra en el ***Anexo 1***.

5.1.2.3 Representación matemática del Modelo Mixto

Al igual que para el primer caso, en este modelo el caudal de entrada se reparte, esta vez para dos contenedores. Cada uno de los contenedores que recibe el caudal de entrada tiene acoplado otro tanque por medio de una resistencia hidráulica. Teniendo en cuenta un flujo q_m entre los contenedores y las resistencias R_1 y R_2:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - q_m \rightarrow \left[A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - \left(\frac{h_1(t) - h_2(t)}{R_1} \right) \right]$$

Luego, su representación en frecuencia es:

$$A_1 * s * H_1(s) = Q_i(s) - \frac{H_1(s) - H_2(s)}{R_1} \qquad (9)$$

Al igualar (*9*) a $Q_i(s)$ y despejando $H_1(s)$ se obtiene la ecuación (*10*) que describe el comportamiento del nivel del tanque 1 con base a la sección del tanque, el caudal de entrada, el valor de la resistencia al flujo y la función de nivel del segundo tanque:

$$H_1(s)\left(A_1 * s + \frac{1}{R_1}\right) - \frac{H_2(s)}{R_1} = Q_i(s) \qquad (10)$$

$$H_1(s) = \frac{R_1}{A_1 * R_1 * s + 1} * Q_i(s) + \frac{1}{A_1 * R_1 * s + 1} * H_2(s) \quad (11)$$

Después, se describe el comportamiento de la altura en el tanque 2 con la ecuación (*12*) haciendo una igualación a 0 y despejando $H_2(s)$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_m - q_o \rightarrow \left[A_2 \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{h_1(t) - h_2(t)}{R_1} \right) - \frac{h_2(t)}{R_2} \right]$$

$$H_2(s) \left(A_2 * s + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{H_1(s)}{R_1} = 0$$

$$H_2(s) = \frac{\frac{1}{R_1} * H_1(s)}{A_2 * s + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (12)$$

Al realizar la sustitución de (*12*) en (*10*) se obtiene:

$$H_1(s) \left(A_1 * s + \frac{1}{R_1} \right) - \frac{1}{R_1} \left(\frac{\frac{1}{R_1}}{A_2 * s + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} * H_1(s) \right) = Q_i(s)$$

Seguido a esto, se factoriza $H_1(s)$ para desarrollar el denominador común del término resaltado, obteniendo (*13*)

$$H_1(s) \left(\boldsymbol{A_1 * s} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_1}} - \frac{\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_1^2}}}{\boldsymbol{A_2 * s} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_1}} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_2}}} \right) = Q_i(s)$$

$$A_1 * A_2 * s^2 + \left(\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_1}{R_2} + \frac{A_2}{R_1} \right) * s + \frac{1}{R_1 * R_2} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta el denominador común, entonces la función de transferencia que describe el comportamiento de la altura del primer tanque con respecto al caudal de entrada está dada por (*14*)

$$\frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_1 * \tau_2 * s + (R_1 + R_2)}{\tau_1 * \tau_2 * s^2 + (\tau_1 + \tau_2 + A_1 * R_2) * s + 1} \quad (14)$$

En donde τ indica la constante de tiempo de cada uno de los tanques y es equivalente al producto de la sección del tanque con el valor de la resistencia hidráulica. Por otro lado, el comportamiento del tanque 2 se analiza con la ecuación (*11*) y se sustituye en la siguiente expresión en el dominio de Laplace:

$$\left[A_2 \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{h_1(t) - h_2(t)}{R_1}\right) - \frac{h_2(t)}{R_2}\right] R_1 * R_2$$

$$A_2 * R_1 * R_2 \frac{dh_2}{dt} = R_2\big(h_1(t) - h_2(t)\big) - R_1 * h_2(t)$$

$$A_2 * R_1 * R_2 \frac{dh_2}{dt} + R_1 * h_2(t) + R_2 * h_2(t) = R_2 * h_1(t)$$

$$A_2 * R_1 * R_2 * s * H_2(s) + R_1 * H_2(s) + R_2 * H_2(s) = R_2 * \boldsymbol{H_1(s)}$$

Siendo el resultado de la función de transferencia del tanque 2:

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_2}{\tau_1 * \tau_2 * s^2 + (\tau_1 + \tau_2 + A_1 * R_2) * s + 1} \qquad (15)$$

5.1.3 Selección del Modelo

De acuerdo a los modelos presentados en la sección 5.1.1 y su respectiva dinámica presentada en 5.1.2, se realiza una comparación por medio de una matriz de Pugh con la que se selecciona el modelo de tanques más adecuado teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa.
La evaluación de los modelos consiste en establecer siete criterios de comparación entre estos, los cuales son:

1. Facilidad de implementación: Hace referencia al nivel de complejidad que posee cada diseño.

2. Capacidad de introducir perturbaciones controladas: Permite observar la calidad del control.

3. Costo relativo: Disminuye los costos de puesta en marcha del montaje experimental.

4. Escalabilidad: Está asociado con la propuesta de expansión del sistema debido a un aumento de visitantes en las instalaciones.

5. Seguridad ante fallas: Permite que los administradores del sistema prevean mantenimientos correctivos durante la ejecución del proceso.

6. Complejidad del modelo matemático: Se relaciona con la dificultad de representar un sistema de mayor orden.

7. Sensibilidad ante perturbaciones: Indica que tanto puede una perturbación afectar el ajuste del SP mientras se lleva a cabo el proceso.

Conforme a los criterios anteriores, la *facilidad de implementación* permite ahorrar tiempo, esfuerzo y recursos; la *capacidad de introducir perturbaciones controladas* es clave para evaluar la respuesta y robustez del sistema ante cambios en el caudal o en las condiciones de operación; el *costo relativo* garantiza que la solución sea viable dentro del presupuesto y el uso de recursos; la *escalabilidad* asegura que el diseño pueda escalar o adaptarse a nuevas necesidades sin volverse obsoleto; la *seguridad ante fallas* mejora la confiabilidad y facilita el mantenimiento; una menor *complejidad del modelo matemático* simplifica el análisis y la sintonización del controlador, favoreciendo el uso de modelos de orden bajo de uno a tres polos dada la necesidad de un diseño de control tolerante a fallas, y una baja *sensibilidad ante perturbaciones* contribuye a mantener el sistema estable.

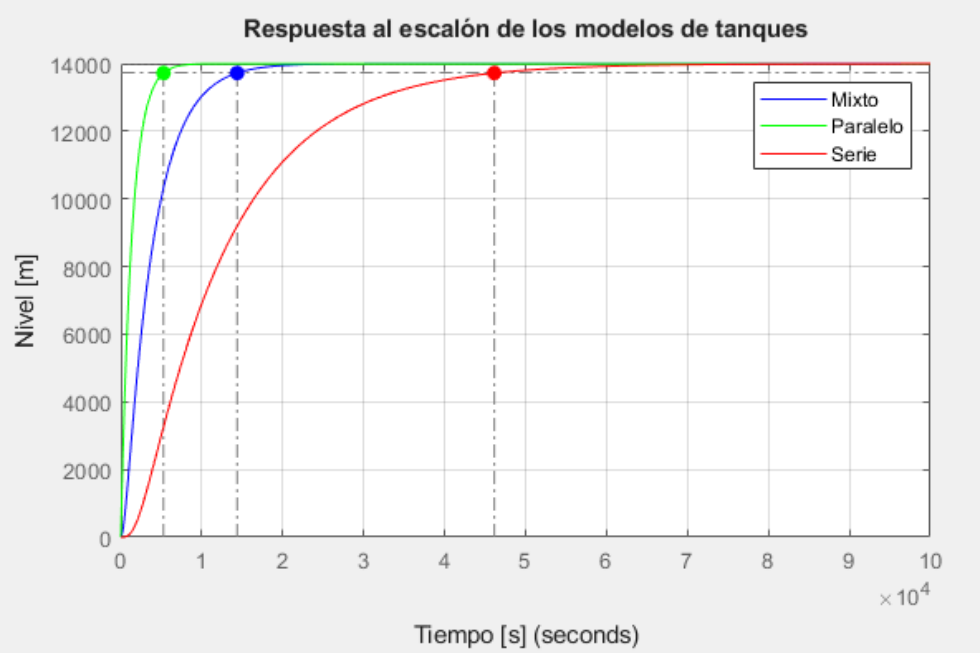
Como se observa en la Tabla 1, el Modelo Paralelo tiene ventaja sobre el modelo de referencia en tres de estos elementos de evaluación: *Facilidad de implementación física*, *Capacidad de introducir perturbaciones controladas* y *Complejidad del modelo matemático*. Por su parte, el Modelo Serie obtiene la puntuación más baja, esto se debe principalmente a la complejidad de un sistema de tanques interconectado de cuarto orden.

Modelo / Criterio	Paralelo	Serie	Mixto (Referencia)
Facilidad de implementación física	1	-1	0
Capacidad de introducir perturbaciones controladas	1	0	0
Costo Relativo	-1	-1	0
Escalabilidad	-1	-1	0
Seguridad ante fallas	-1	-1	0
Complejidad del modelo matemático	1	-1	0

Sensibilidad ante perturbaciones	-1	-1	0
TOTAL	-1	-6	0

Tabla 1. Matriz de Pugh para selección de Modelo. Autoría propia.

Además de la comparación por medio de la matriz de Pugh, la Gráfica 1 muestra el comportamiento de los tres sistemas ante una entrada de escalón unitario; con esto se evidencia que el análisis del comportamiento de los modelos de tanques descrito por los trabajadores de Sanitarias e Hidráulicas Manuel Rincón S.A.S concuerda con la representación matemática y su simulación de dinámica; pues el *modelo paralelo* tiene un tiempo de respuesta menor al del *modelo mixto* y el *modelo serie*, siendo este último el que tarda más en llegar a la referencia establecida.



Gráfica 1. Simulación de respuesta al escalón de los modelos matemáticos. Autoría propia.

En consecuencia, ***se selecciona el Modelo Mixto gracias al equilibrio favorable entre complejidad, costo y aplicabilidad en la práctica***.

Luego, en la Figura 9 se presenta el diagrama de conexión del prototipo considerando previamente la ubicación de los indicadores de nivel y caudal, así como los elementos actuadores. En este diagrama se detalla la conexión del prototipo por medio de tuberías; en la primera parte se evidencia un tanque de reserva que cuenta con un equipo de bombeo el cual eleva el líquido dispuesto hacia los tanques de almacenamiento primarios; cada uno de los tanques de almacenamiento cuenta con transmisores de nivel.

La conexión entre los tanques primarios y secundarios se realiza por medio de 3 elementos: *válvula de control, indicador de flujo y válvula de retención*; estos equipos en conjunto permiten controlar el flujo entre tanques y evitar su retorno al tanque principal para así mantener un nivel establecido.

Por último, se incluye una válvula de bola por cada pareja de tanques para recircular el líquido hacia el tanque de reserva; la adición de este componente cumple un doble propósito: primero, facilitar la introducción de perturbaciones controladas al sistema; y segundo, reutilizar el líquido de trabajo para pruebas posteriores.

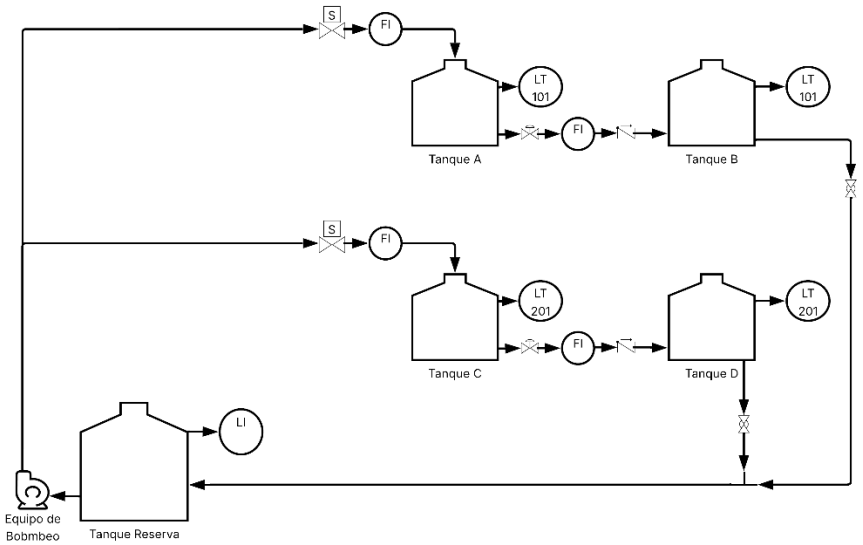


Figura 9. Diagrama de conexión del prototipo. Autoría propia.

5.2 Selección de técnica de control

Para determinar la técnica de control se consideran siete criterios para evaluar las técnicas mencionadas en la sección 3.2.

1. Robustez: Identifica la técnica de control que tiene la capacidad de adaptarse a los cambios que tiene el sistema en determinados tiempos.

2. Costo computacional: Asemeja el esfuerzo del microcontrolador para ejecutar una o diversas tareas.

3. Facilidad de sintonización: Evalúa la sencillez con la que se puede incluir la técnica con respecto al sistema.

4. Mantenimiento y ajuste: Se refiere a la capacidad que tiene la técnica para ajustar su ecuación y parámetros equivalentes.

5. Dependencia del modelo matemático: Califica qué tan estricta es la dependencia del controlador en relación con el modelo matemático que identifica el sistema.

6. Tiempo de respuesta: Hace alusión al tiempo que demora en hacer efecto la técnica considerando el proceso que se ejecuta.

7. Simplicidad de implementación: Indica con que facilidad se puede incluir la técnica en el microcontrolador.

De estos criterios, la *robustez* asegura un desempeño confiable frente a variaciones del caudal y nivel; el *costo computacional* determina la cantidad de memoria y procesamiento necesarios, favoreciendo métodos ligeros que funcionen en microcontroladores; la *facilidad de sintonización* simplifica el ajuste de parámetros y acelera la puesta en marcha; el *mantenimiento y ajuste* facilita corregir o recalibrar el controlador a lo largo del tiempo, incluso adaptándolo a nuevas condiciones; la *dependencia del modelo matemático* valora cuánta precisión requiere el modelo del sistema, siendo preferibles métodos menos sensibles a errores de modelado; el *tiempo de respuesta* garantiza que el sistema reaccione con rapidez ante cambios o perturbaciones; y la *simplicidad de implementación* reduce la complejidad del código, haciéndolo más legible y limpio para futuros desarrollos.

A partir de ello, se construye la matriz de Pugh presentada en la Tabla 2 que toma como referencia el PID.

TÉCNICA / CRITERIO	IoT	MPC	FUZZY LOGIC	IMC	PID (Referencia)
Robustez	-1	1	1	1	0
Costo computacional	0	-1	-1	-1	0
Facilidad de sintonización	-1	-1	-1	-1	0
Mantenimiento y ajuste	1	-1	-1	-1	0
Dependencia de modelo matemático	-1	-1	-1	-1	0
Tiempo de respuesta	-1	1	1	0	0
Simplicidad de Implementación	1	-1	0	-1	0
TOTAL	0	-3	-2	-4	0

Tabla 2. Matriz de Pugh de Técnicas de Control. Autoría propia.

A pesar de que el Internet de las cosas (IoT) no hace referencia a un tipo de controlador que tenga bases teóricas relacionadas con la temática de identificación de sistemas dinámicos y control de los mismos, esta estrategia está condicionada al criterio del usuario ya que según las especificaciones que él brinde, el sistema dará una respuesta de tal manera que encienda o apague los actuadores que contenga el sistema. No obstante, esta herramienta permite tomar decisiones informadas gracias a que dispone de información del sistema en tiempo real. [65] [66]

Con base en los resultados de la Tabla 2, se observa que tanto la técnica de FL como la basada en IOT tienen ventajas frente al PID. Sin embargo, el costo computacional de FL y el tiempo de respuesta de IOT son factores que las descartan, ya que el PID ofrece un mejor desempeño en tiempos de respuesta frente a IOT y menor requerimiento computacional.

Por lo tanto, considerando el compromiso entre rendimiento, complejidad de implementación y recursos disponibles, ***el controlador PID se establece como la opción más adecuada para el control de nivel y caudal en el sistema propuesto.***

5.3 Integración de sensores

Esta sección analiza el comportamiento de los sensores usados para la ejecución de la técnica seleccionada en la sección 5.2. El análisis se realiza por medio de la caracterización de cada tipo de sensor y su linealización respectiva; para llevar a cabo estos últimos se emplea un microcontrolador ESP32 que destaca por su diseño robusto capaz de soportar condiciones ambientales, bajo consumo, conexión WiFi y velocidades de procesamiento más altas comparadas con otros de su mismo segmento. [51] [67]

5.3.1 Selección de medidor de Nivel

Para la comparación entre diferentes referencias de sensores capaces de medir nivel se consideran siete criterios, entre estos se encuentran:

1. Precisión: Describe la exactitud de la medición de distancia que proporciona el sensor.

2. Costo: Hace referencia al precio de cada sensor.

3. Rango de medición: Indica los límites en los cuales la medición otorgada por el sensor es certera.

4. Inmunidad ambiental: Establece que tan afectados se ven los sensores ante los factores climáticos.

5. Consumo energético: Califica el consumo de cada sensor, siendo un consumo bajo la mejor opción.

6. Compatibilidad: Evalúa la capacidad de integración del sensor con el microcontrolador.

7. Facilidad de instalación: Se refiere a la simplicidad para incluir el sensor en el montaje.

Con respecto a los criterios mencionados, la *precisión* asegura lecturas confiables que mantienen el nivel en el punto de ajuste sin desbordamientos ni vaciados; el *costo* permite equilibrar desempeño y presupuesto sin sacrificar calidad; el *rango de medición* debe cubrir por completo la altura de los tanques para ofrecer datos útiles en todas las condiciones; la *inmunidad ambiental* protege el desempeño del sensor frente a temperatura, humedad y luz solar; el *consumo energético* ayuda a reducir el gasto y facilita un funcionamiento estable a largo plazo; la *compatibilidad* con el microcontrolador simplifica la integración y programación; y la *facilidad de instalación* agiliza el montaje físico, ahorra tiempo y contribuye a un prototipo confiable y práctico.

En la Tabla 3, se observa que el sensor *HC-SR04*, que se tiene de referencia, presenta varios beneficios frente a los otros dos sensores evaluados, entre estos destacan su *costo*, *rango de medición* e *inmunidad ambiental*.

Criterio \ Sensor	VL53L0X	GP2Y0A21	HC-SR04 (Referencia)
Precisión	-1	1	0
Costo	-1	-1	0
Rango de medición	-1	-1	0
Inmunidad ambiental	-1	-1	0
Consumo energético	1	1	0
Compatibilidad	0	-1	0
Facilidad de instalación	0	0	0
TOTAL	-3	-2	0

Tabla 3. Matriz de Pugh de sensor de nivel. Autoría propia.

Por un lado, en cuanto a *compatibilidad*, *facilidad de instalación* y *consumo energético*, el sensor de referencia comparte características con el sensor *VL53L0X*, por lo que puede ser una alternativa a la referencia.

En cuanto al sensor *GP2Y0A21* su *costo* es más elevado, pero cuenta con mayor *precisión* y comparte la *facilidad de instalación* con el sensor de referencia.

Finalmente se ***elige el sensor de referencia*** dado su *costo* y *rango de medición* con los que beneficia al proyecto en el aspecto económico y permite tener un buen espectro de medición para el diseño del controlador.

5.3.1.1 Sensor de ultrasonido HC-SR04

De acuerdo a la selección del instrumento de medición de nivel, se escoge el sensor HC-SR04 que permite medir la distancia existente entre un objeto y él mismo; su principio de funcionamiento radica en emitir ondas que chocan con un objeto que esté en su radar y son reflejadas hacia ellos a gran velocidad. Una vez se capta la onda reflejada, se traduce en un tren de pulsos con un ancho dependiente de la distancia a la que se encuentra el objeto. Este tipo de sensores se utiliza para la percepción de obstáculos, medición de nivel y control de distancia automática. [68]



Imagen 6. Sensor HC-SR04. Tomado de *[69]*.

5.3.1.1 Caracterización del sensor de Nivel

Para definir el comportamiento de este sensor, se toma la medida de la distancia entre un objeto y el dispositivo con el montaje experimental presentado en la Imagen 7; para este, se toma como instrumento de referencia un medidor de distancia laser DLR130 proporcionado por los laboratoristas del edificio Ángel Calatayud, de la sede principal de la universidad. La medición se ejecuta con el microcontrolador ESP32 y éste calcula el tiempo que dura la onda de sonido en rebotar desde el sensor hasta el objeto; teniendo en cuenta la fórmula que proporciona el fabricante para determinar la distancia:

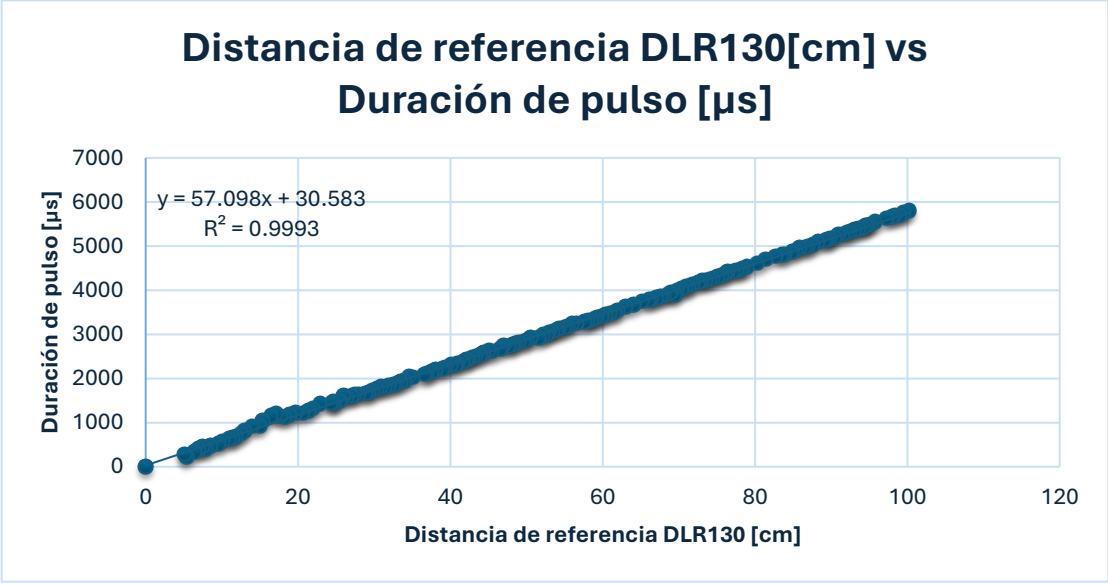
$$Distancia = \frac{Duración\ del\ pulso\ *\ Velocidad\ del\ sonido\ \left[\frac{m}{s}\right]}{2} \quad (16)$$



Imagen 7. Montaje experimental con sensor HC-SR04 y medidor laser DLR130. Autoría propia.

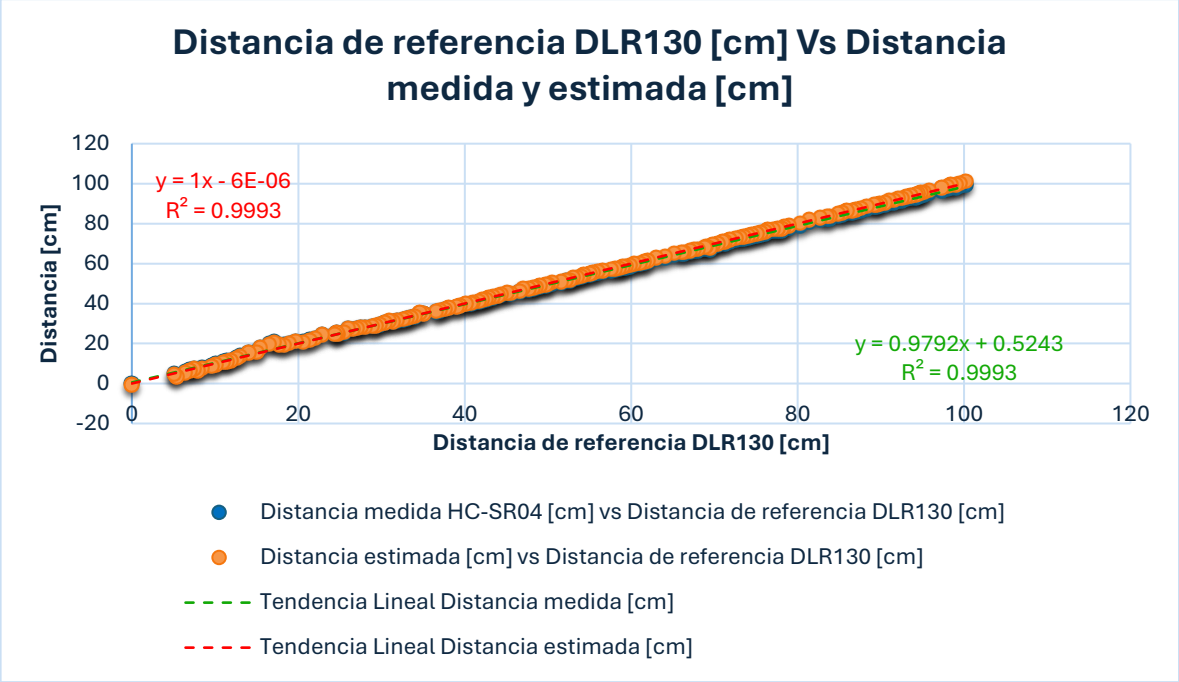
5.3.1.2 Linealización del sensor HC-SR04

Luego de tomar la medición de distancia cada 0.5 cm con el sensor de ultrasonido y verificando el equipo de referencia, se representan gráficamente los datos en la Gráfica 2; en esta se evidencia un comportamiento lineal entre la distancia medida por el equipo de referencia y la duración de los pulsos que calcula el microcontrolador. Además, se obtiene una ecuación de tendencia lineal; que al ser despejada en función de la variable de interés (x), se consigue una estimación de la distancia real.



Gráfica 2. Distancia de referencia vs Duración de pulso. Autoría propia.

A partir de la calibración con la ecuación inversa presentada en la Gráfica 2, se realiza un análisis del error y la exactitud que tiene cada representación matemática; de allí resulta la Gráfica 3.



Gráfica 3. Distancia de referencia vs Distancia medida y estimada. Autoría propia.

En esta última etapa se validó la exactitud del sistema. Para lograrlo, se compararon directamente tres fuentes de datos de distancia: la medición que dio el sensor, el valor calculado con la ecuación inversa, y el valor real o de referencia que se obtuvo del equipo de precisión del laboratorio.

En la Gráfica 3 se evidencia un coeficiente de correlación idéntico al obtenido con la estimación de la distancia; las ecuaciones que describen las tendencias lineales de cada serie de datos se diferencian por sus pendientes e intercepciones, mientras que la distancia medida tiene una pendiente casi unitaria.

Conforme al análisis del error y exactitud de cada serie de datos, se genera la Tabla 4

ERROR RELATIVO % DE MEDICIÓN MÁXIMO	**3.6926%**
EXACTITUD DE MEDICIÓN	**96.3074%**
ERROR RELATIVO % DE ESTIMACIÓN MÁXIMO	**3.6014%**
EXACTITUD DE ESTIMACIÓN	**96.3986%**

Tabla 4. Exactitud de dispositivos de medición de distancia. Autoría propia.

Los resultados de la

ERROR RELATIVO % DE MEDICIÓN MÁXIMO	**3.6926%**
EXACTITUD DE MEDICIÓN	**96.3074%**
ERROR RELATIVO % DE ESTIMACIÓN MÁXIMO	**3.6014%**
EXACTITUD DE ESTIMACIÓN	**96.3986%**

Tabla *4* indican que la ecuación proporcionada por el fabricante tiene una exactitud de 96.3074%, mientras que la linealización del sensor aumenta su exactitud un 0.0912%; por lo tanto, se opta por la ecuación linealizada. En consecuencia, la ecuación (16) se implementa en el microcontrolador considerando el intercepto y modificando la pendiente con el valor del mismo parámetro, según lo define la ecuación empleada para la linealización:

$$Distancia\ estimada = \frac{Duración\ del\ pulso - 30.583}{57.098}$$

El detalle del proceso de linealización del sensor de ultrasonido se encuentra en el ***Anexo 2***.

5.3.2 Selección de medidor de caudal

De la misma manera, para los sensores de caudal se consideran tres referencias de sensores que se consiguen en el mercado y se comparan entre sí a partir de siete criterios para seleccionar el más conveniente para su aplicación en el proyecto. Los criterios son:

1. Precisión: Determina la exactitud de la medición del flujo que pasa por una tubería.

2. Rango: Señala los valores mínimos y máximos en los que opera cada sensor.

3. Pérdida de presión: Informa que tanta presión pierde el líquido en una tubería al pasar por cada sensor.

4. Durabilidad: Expresa cuanto se desgasta un sensor con el paso del tiempo.

5. Costo: Considera el costo unitario de cada sensor.

6. Facilidad de instalación: Valora la habilidad que se requiere para instalar el sensor en el montaje experimental.

7. Interpretación de señal: Toma en cuenta la capacidad del microcontrolador para procesar la señal resultante de la medición del sensor.

La *precisión* garantiza mediciones confiables que permiten al controlador operar con datos correctos; el *rango* debe cubrir desde el caudal mínimo hasta el máximo esperado, evitando saturaciones o zonas sin lectura; la *pérdida de presión* debe ser baja para no afectar el flujo; la *durabilidad* asegura que el sensor resista el desgaste, partículas de polvo sin perder exactitud con el tiempo; el *costo* permite equilibrar desempeño y presupuesto, eligiendo una opción que cumpla los requisitos sin exceder las necesidades; la *facilidad de instalación* simplifica el montaje en la tubería, reduce el riesgo de fugas y ahorra tiempo; y la *interpretación de señal* valora que la salida del sensor sea fácil de leer y procesar por el microcontrolador, agilizando la programación.

Según lo observado en la Tabla 5, aunque el *SFM3200* presenta mejores características técnicas en *precisión* y *durabilidad*, su elevado *costo* lo descarta para aplicaciones de presupuesto limitado. Por otro lado, el *Flow P500*, si bien ofrece una interfaz compatible con microcontroladores, presenta una *precisión* inferior a la del YF-S201 y una *instalación* más compleja, lo que reduce su practicidad.

Criterio \ Sensor	Flow P500	SFM3200	YF-S201 (Referencia)
Precisión	-1	1	0
Rango	0	1	0
Pérdida de presión	1	1	0
Durabilidad	1	1	0
Costo	-1	-1	0
Facilidad de instalación	0	-1	0
Interpretación de señal	1	-1	0
TOTAL	1	1	0

Tabla 5. Matriz de Pugh de sensor de caudal. Autoría propia.

Siendo así, ***el sensor de referencia resulta ser la opción más adecuada*** gracias a su bajo *costo*, *facilidad de integración* y *precisión* suficiente para el monitoreo de caudal, cumpliendo así con los criterios establecidos en la matriz.

5.3.2.1 Sensor YF-S201

En función de la selección de medidor de caudal, se toma el sensor de turbina de referencia YF-S201 el cual mide el caudal de un fluido en una tubería a través de una turbina que gira con el paso del líquido, esto hace rotar un imán en su eje y altera el campo magnético circundante. Estas variaciones son detectadas por un sensor de efecto

Hall, que genera una señal de pulsos eléctricos cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del flujo. [70]



Imagen 8. Sensor YF-S201. Tomado de *[71]*.

5.3.2.2 Caracterización del sensor de Caudal

Para evidenciar el comportamiento de este sensor, se implementa el montaje experimental mostrado en la Imagen 9; este consta de un contenedor de reserva, un contenedor de alimentación, un equipo de bombeo de referencia SEAFLO que cuenta con capacidad de mantener un flujo constante de 16 litros por minuto y el sensor de caudal en cuestión; con este montaje, el tanque de reserva es llenado por medio de una tubería de media pulgada proveniente del equipo de bombeo sumergido dentro del tanque de alimentación. Este montaje permite conocer el volumen de agua que fluye a través del sensor y es almacenado en el recipiente de reserva.

Para recolectar los datos del sensor, el microcontrolador ESP32 estima el conteo de pulsos por medio de una interrupción. Adicionalmente se toma un registro videográfico con el que se comparan las mediciones de la balanza con el cálculo de caudal que toma en cuenta los pulsos registrados por el microcontrolador. Esto se lleva a cabo gracias a la relación entre pulsos y el volumen equivalente a cada pulso que describe el fabricante, como se muestra en (17).

$$Volumen\ por\ pulso = \frac{1}{450}\ \left[\frac{L}{pulsos}\right] \qquad (17)$$

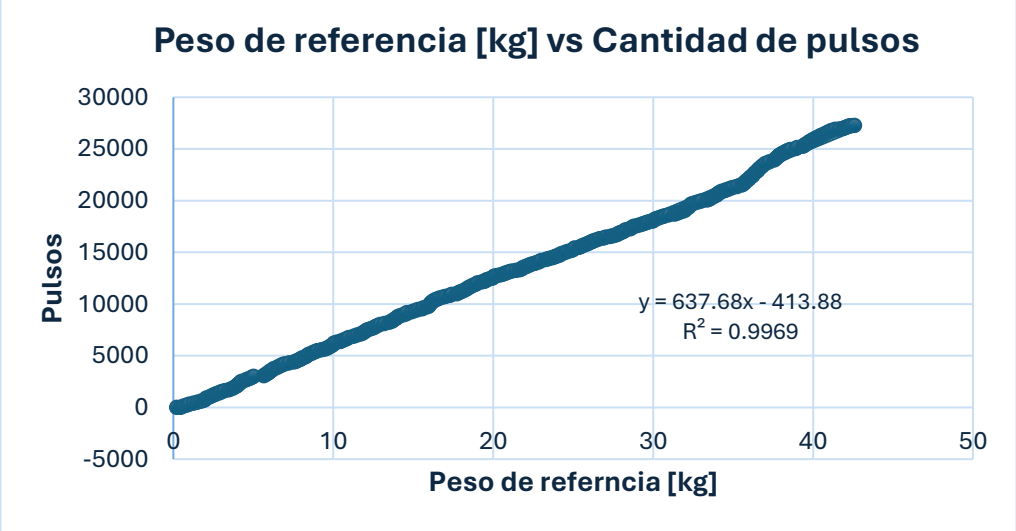


Imagen 9. Montaje experimental con sensor YF-S201. Autoría propia.

5.3.2.3 Linealización del sensor YF-S201

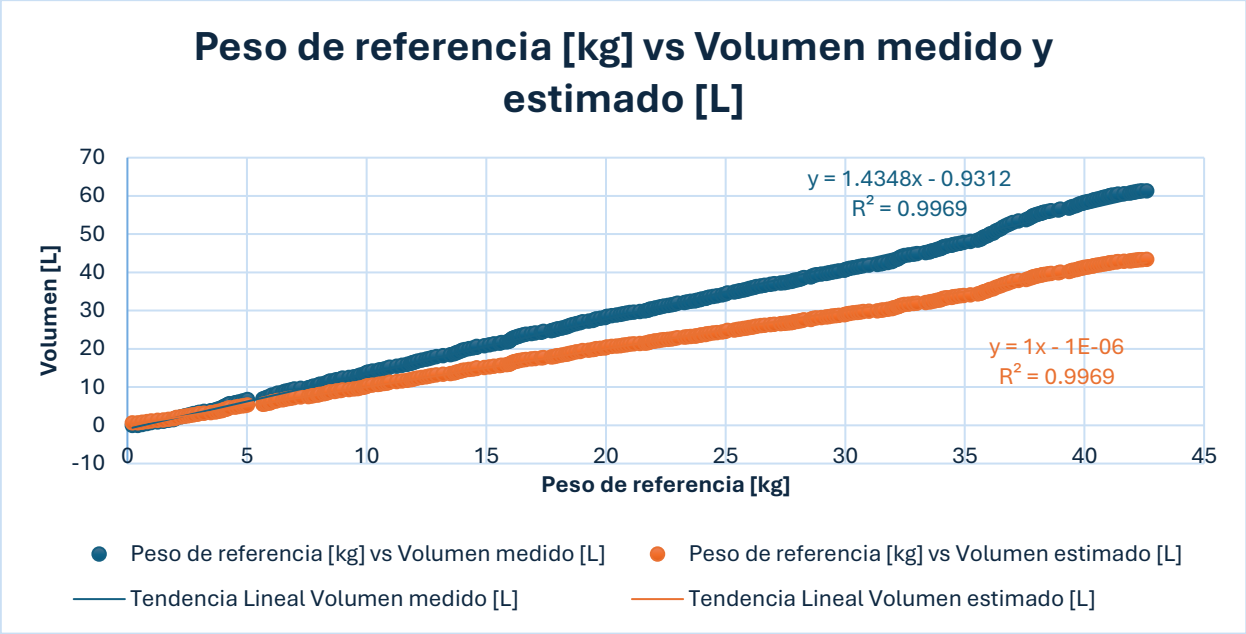
Para la linealización del dispositivo de caudal, se recolectan datos de flujo con el microcontrolador por medio de una rutina de interrupción que consiste en el conteo de pulsos otorgados por el sensor ante el paso del flujo de agua. Este proceso se realiza mientras el líquido pasa de un contenedor a otro por medio de una tubería horizontal.

Una vez procesados, los datos de peso y la cantidad de pulsos se visualizan en la Gráfica 4. Estos describen el comportamiento de los pulsos en función del peso registrado por el equipo de referencia; de allí se obtiene la ecuación de tendencia con la que se despeja la variable de interés (x) y se obtiene un volumen estimado.



Gráfica 4. Peso [kg/s] vs Cantidad de Pulsos. Autoría propia.

Con base en lo anterior, se elabora la Gráfica 5; esta refleja el comportamiento del volumen medido y estimado en función de la medición de peso determinada por el equipo de referencia. En adición, se comprueba que la ecuación linealizada por medio del despeje de la variable de interés tiene una pendiente unitaria, por lo que su comportamiento lineal la define como una alternativa para la medición de caudal con el sensor seleccionado.



Gráfica 5. Peso [kg] vs Volumen medido y estimado [L]. Autoría propia.

Según el análisis de error y exactitud presentado en el ***Anexo 3*** y la gráfica anterior, se desarrolla la

Error relativo % máximo de medición	**44.78%**
Exactitud de medición	**55.22%**
Error relativo % máximo de estimación	**1.83%**
Exactitud de estimación	**98.17%**

Tabla *6*, en donde se observa que la exactitud de la estimación del caudal se incrementa un 42.95% respecto a la medición con el sensor.

Error relativo % máximo de medición	**44.78%**
Exactitud de medición	**55.22%**
Error relativo % máximo de estimación	**1.83%**
Exactitud de estimación	**98.17%**

Tabla 6. Exactitud de dispositivos de caudal. Autoría propia.

Debido a ello se selecciona la ecuación inversa con la que se despeja el valor del volumen estimado; de tal manera que la ecuación que se incluye en el microcontrolador es la ecuación (18); esta ecuación considera la pendiente y el intercepto obtenidos mediante la calibración por regresión lineal y se realizan diversos cálculos con ella para determinar el flujo instantáneo, flujo en un minuto y el flujo acumulado.

$$Volumen\ estimado = \frac{pulsos\ acumulados + 413.88}{637.68} \quad (18)$$

5.4 Modelo dinámico del actuador

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que al ser excitado en su terminal de control con una señal digital mediante PWM ajusta la posición de su eje en función del ancho del pulso que se le proporciona. [72]

El desarrollo del control considera la unión de un servomotor con una válvula para variar el flujo entre tanques consiguiendo el nivel deseado. Para conocer el comportamiento del sistema resultante, se obtiene una aproximación de la función de transferencia a partir del manejo de datos de ángulo deseado y ángulo real con el montaje presentado en la Imagen 10 y el sistema de identificación de MATLAB, el código utilizado para este fin se encuentra en el ***Anexo 4***.

La toma de datos se realiza cada 5° con la finalidad de tener una resolución apta que describa el movimiento de la servo-válvula cuando se incrementa y se decrementa la apertura de la válvula.

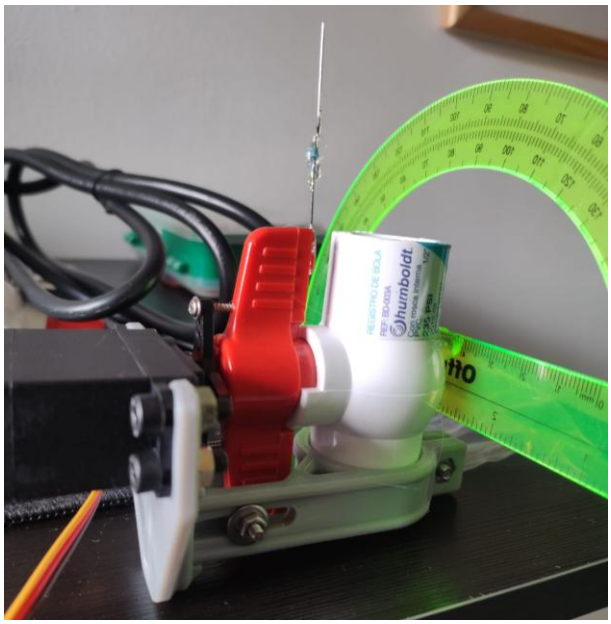


Imagen 10. Montaje experimental con servo-válvula y transportador. Autoría propia.

5.4.1 Representación matemática del actuador

Luego de analizar los datos de movimientos de la servo-válvula con el System Identification toolbox de MATLAB, se obtiene una tf que representa el comportamiento dinámico del conjunto del actuador en los movimientos ascendente (apertura) y descendente (cierre), como se evidencia en la Imagen 11.

```
%% Función de transferencia de la servo-válvula MG995 %%

%% Entrada (señal enviada) %%
u_up =   [0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90];
u_down = [90; 85; 80; 75; 70; 65; 60; 55; 50; 45; 40; 35; 30; 25; 20; 15; 10; 5; 0];

%% Salida (ángulo medido con transportador) %%
y_up =   [0; 2; 6; 10; 13; 17; 20; 25; 30; 37; 42; 45; 52; 57; 61; 65; 70; 75; 83];
y_down = [83; 75; 73; 68; 66; 65; 61; 55; 50; 47; 41; 36; 30; 25; 22; 15; 11; 5; 0];

%% Tiempo de muestreo %%
Ts = 1;

%% Modelos de datos %%
data_up = iddata(y_up,u_up,Ts);
data_down = iddata(y_down,u_down,Ts);

%% Estimacion de Tf Up_Down     2P - 2Z
data_total = merge(data_up,data_down);
tf_total = tfest(data_total,2,2)
```

```
ommand Window

tf_total =

  From input "u1" to output "y1":
  0.5545 s^2 + 0.02065 s + 0.1401
  -------------------------------
      s^2 + 0.1065 s + 0.1543
```

Imagen 11. Código de estimación de tf del actuador. Autoría propia.

El modelo estimado presenta un ajuste de 95.1% con respecto a los datos recolectados, por lo que puede generalizar el comportamiento del actuador con una única tf.

5.5 Diseño Electrónico

Una vez descritos matemáticamente los componentes del sistema, se procede con la fase de implementación que incluye el diseño del circuito y del circuito impreso; para ello se emplea un software de uso abierto para el diseño de esquemas electrónicos y circuitos impresos en una o más capas que se pueden observar como un modelo en tres dimensiones. [73]; esta etapa se realiza en KiCad gracias a las herramientas que dispone para la creación de esquemáticos con las referencias de los componentes, verificación de reglas de diseño, representación tridimensional y capacidad de generar archivos de producción.

5.5.1 Diseño de circuito

Los diseños de los circuitos consideran filtrados de señal para la alimentación de los microcontroladores; acoples de tierras con el fin de tener una misma referencia sin afectar el retorno de la corriente hacia los dispositivos de procesamiento, aislamientos entre las señales de control y la sección de potencia para evitar interferencias eléctricas, y conectores para cada tipo de sensor; los esquemáticos de estos y la visualización capa por capa de cada uno se encuentra en el ***Anexo 5***.

En primera instancia, la Imagen 12 muestra el diseño del circuito impreso destinado a la adquisición de las mediciones de nivel, para ello se añade un circuito integrado que opera como multiplexor y demultiplexor. Este se integra al ESP32 que se encarga del cálculo de nivel para despejar el hardware disponible. Su comportamiento lógico, que evidencia los estados con los que varían las señales entre el microcontrolador y el integrado, se describen mediante la tabla de verdad (Tabla 7). Dicha tabla detalla la conmutación del habilitador y los selectores; estos últimos permiten alternar el muestreo de la señal determinada para cuatro sensores de nivel.

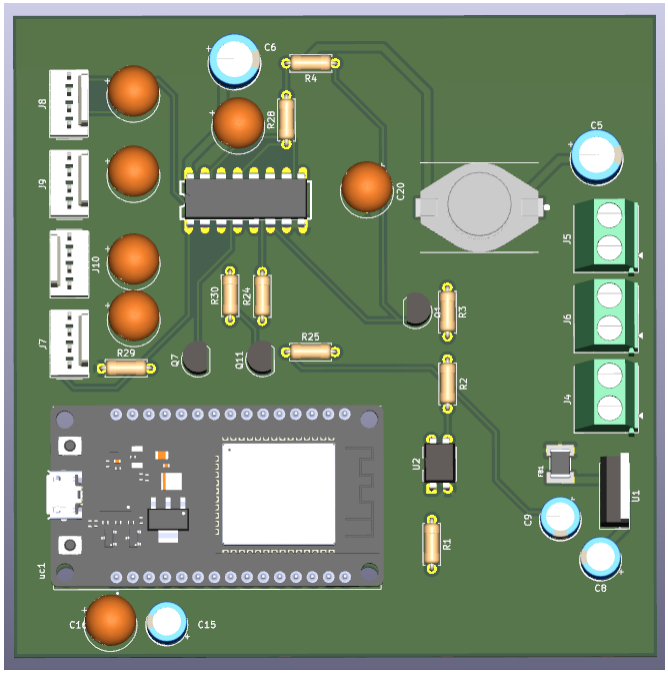


Imagen 12. Diseño de circuito - Nivel. Autoría propia.

			74HC4052	
E	**S0**	**S1**	**Out1 X**	**Out1 Y**
0	0	0	X0	Y0
0	0	1	X1	Y1
0	1	0	X2	Y2
0	1	1	X3	Y3
1	X	X	-	-

Tabla 7. Tabla de verdad de los MUX / DEMUX 74HC4052. Autoría propia.

El segundo circuito es delegado para la medición de caudal por medio de los sensores YF-S201. Para disminuir la tensión de las señales de los sensores, se emplean cambios de niveles lógicos de 5 V a 3.3 V con arreglos de transistores como se observa en la Imagen 13 .

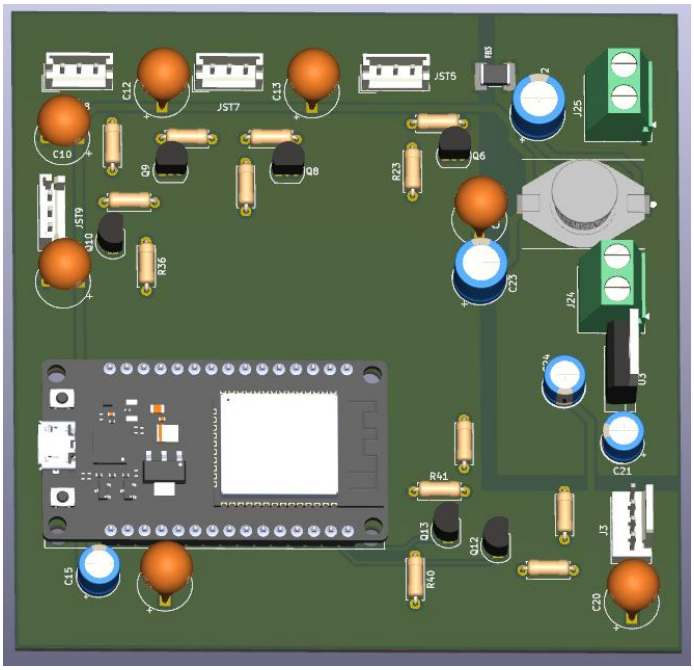


Imagen 13. Diseño de circuito - Caudal. Autoría propia.

Por último, la Imagen 14 presenta el diseño de la placa para la conexión e interacción con los actuadores de la planta como servomotores, electroválvulas y equipo de bombeo. En este circuito se emplean protecciones con diodos y optoacopladores para que la corriente siga un único camino y la señal de control de los actuadores no se mezcle con la sección de potencia.

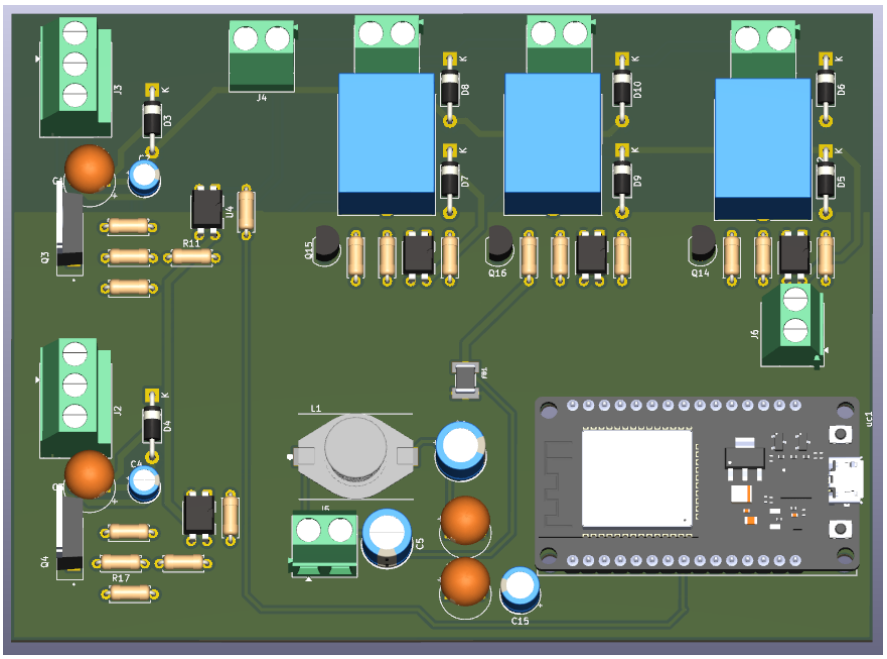


Imagen 14. Diseño de circuito - Actuadores. Autoría propia.

5.6 Código fuente

La implementación del firmware se fundamenta en la capacidad de procesamiento del microcontrolador ESP32, el cual dispone de una arquitectura de doble núcleo. Esta característica es crucial para la aplicación del sistema operativo de tiempo real FreeRTOS, permitiendo una ejecución multihilo (multitarea). Esta capacidad multihilo facilita la gestión concurrente de diversas tareas críticas—como el muestreo de sensores y la gestión de la conectividad—sin incurrir en interrupciones no deseadas o degradación del rendimiento de los procesos.

Para la comunicación entre los microcontroladores se adoptó el protocolo MQTT. Este protocolo ligero opera mediante un modelo de publicación-suscripción, implementado a través de un servidor *broker* alojado localmente. Esta disposición garantiza una comunicación asíncrona y eficiente, minimizando la latencia y asegurando la integridad de los datos, lo cual es fundamental para mantener la frecuencia de muestreo óptima de los sensores subyacentes.

Adicionalmente, el sistema requiere una plataforma que permita la visualización y control remoto de los datos. Para ello, se seleccionó la plataforma Blynk, reconocida por su enfoque de código abierto orientado al desarrollo de aplicaciones del IoT. Blynk facilita la interacción entre usuarios y dispositivos conectados a Internet, ofreciendo una UI disponible en dispositivos móviles y promoviendo el desarrollo a escala. Su arquitectura basada en la nube no solo simplifica la gestión remota, sino que también confiere la escalabilidad necesaria para aplicaciones industriales o de domótica. [74]

Por consiguiente, el código fuente para cada microcontrolador es estructurado de forma paralela, como se observa en Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

La arquitectura vista en la Figura 10 divide el procesador del primer microcontrolador. El núcleo cero se encarga de mantener la conexión WiFi, y enviar los datos de nivel de manera ordenada a la UI. Por otro lado, el núcleo uno se encarga de realizar las mediciones de la variable de manera constante, recibe la referencia propuesta por el usuario y la escribe en el tópico de *referencia* en el servidor.

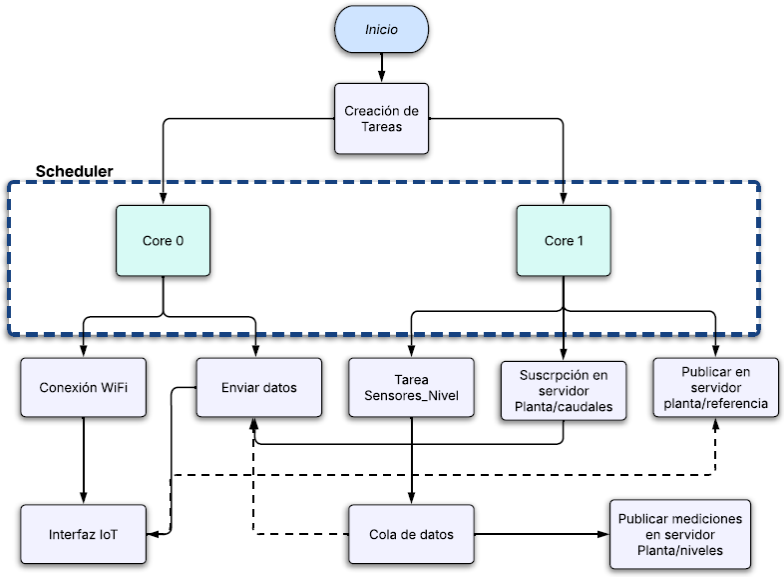


Figura 10. Arquitectura de tareas del ESP32 - NIVEL. Autoría propia.

La segunda arquitectura que se expone en la Figura 11 está enfocada en la medición de caudal—con dos grupos de procesamiento para dos interrupciones cada uno—y la transmisión de los mismos al tema *caudales* del servidor broker por medio de la conexión WiFi que establece el núcleo cero.

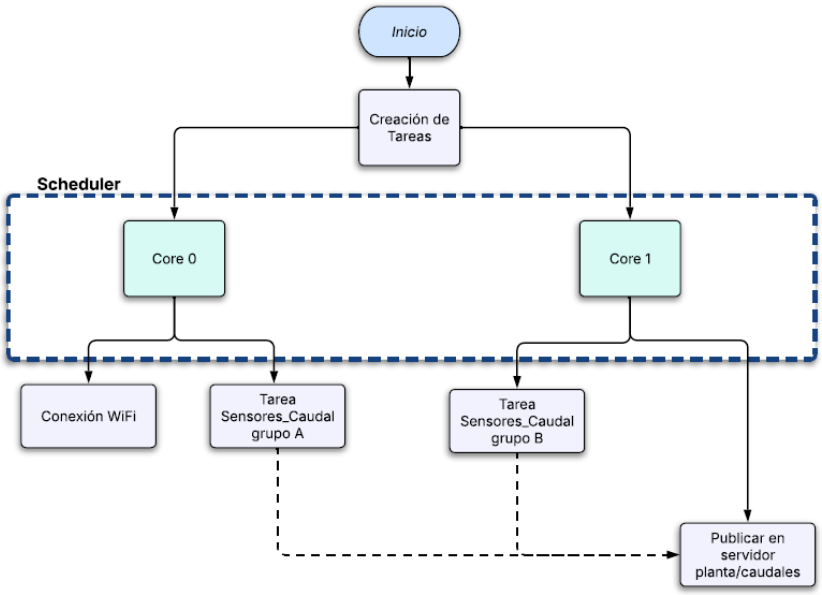


Figura 11. Arquitectura de tareas del ESP32 - CAUDAL. Autoría propia.

Por último, se emplea una arquitectura de tareas en paralelo en la Figura 12 con la finalidad de accionar los dispositivos capaces de interactuar con el proceso. Al igual que en las arquitecturas anteriores, el núcleo principal es asignado para la ejecución de la conexión WiFi y la suscripción a *niveles* y *referencia*, mientras que el núcleo uno toma decisiones sobre los actuadores.

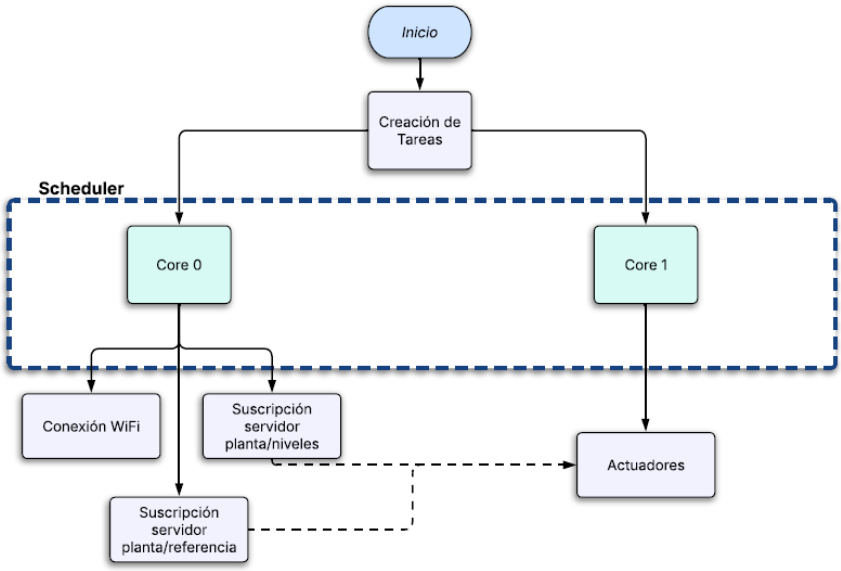


Figura 12. Arquitectura de tareas del ESP32 - ACTUADORES. Autoría propia.

6. RESULTADOS

6.1 Simulación del modelo

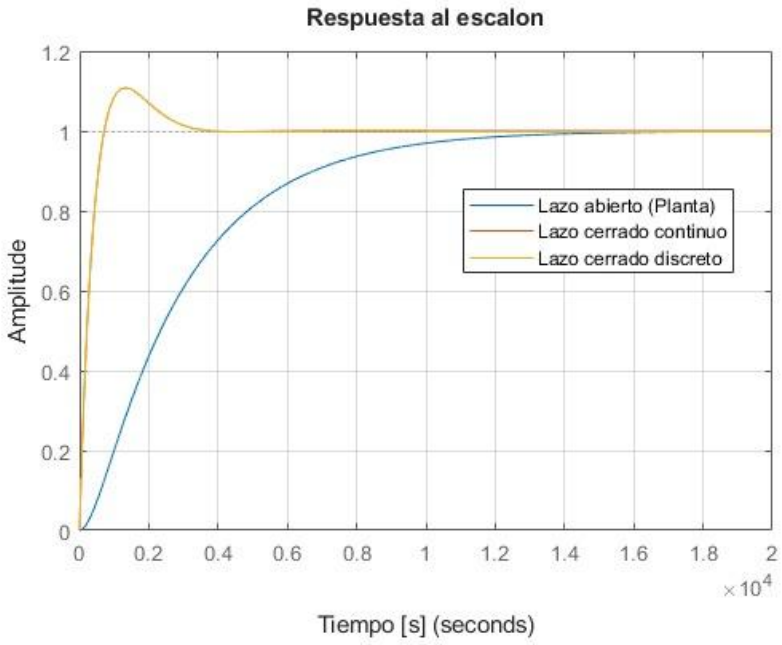
En primera instancia, se obtiene el valor de la resistencia mediante la medición de nivel y caudal entre dos contenedores separados por una servo-válvula; este actuador nos permite desplazar la válvula a una posición determinada y así alterar el caudal que pasa hacia el segundo contenedor.

Una vez analizados los datos de apertura y cierre con actuador, se toma en cuenta la ecuación (19) que permite conocer el valor de la resistencia hidráulica por medio del diferencial de altura en los contenedores y el caudal que pasa a través de la tubería que los conecta. Este procedimiento se encuentra detallado en el ***Anexo 6***.

$$R = \frac{\Delta h}{Q} \qquad (19)$$

Con esto se determina que la resistencia hidráulica es $1.1641 * 10^4 \frac{m}{m^3/s}$ y se lleva a cabo la simulación del modelo; por consiguiente, se encuentra la acción de control y con esta las constantes del PID y la tf de la planta. Seguido a esto se observa la gráfica obtenida en lazo abierto en tiempo continúo evidenciando que la planta se estabilizada en $1.6 * 10^4$ seg.

Para que el ESP32 sea capaz de gestionar la acción de control por medio de las mediciones adquiridas de nivel, se le asigna un tiempo de muestreo con el fin de ejecutar el controlador en lazo cerrado. En la Gráfica 6 se encuentra el controlador en tiempo continuo y discreto, en ella se logra analizar que en ambos dominios de tiempo el sistema se estabiliza más rápido que en lazo abierto, dando a entender que el controlador reduce el tiempo en el que se estabiliza el sistema.



Gráfica 6. Respuesta al escalón en lazo abierto y cerrado. Autoría propia.

6.2 Prototipo a escala

Teniendo en cuenta que en la sección 5.1.3 se selecciona el prototipo mixto, en la Imagen 15 se encuentra el montaje del prototipo; este cuenta con 4 tanques de 40L y un tanque de reserva de 200L, estos integran un sensor de nivel con el propósito de llevar un registro en tiempo real de cada tanque y así referenciar el error entre la medición y lo deseado por el usuario. Así mismo, el prototipo cuenta con 4 sensores de caudal que miden el flujo en las ramas subyacentes a cada par, estos datos son enviados a la interfaz con el objetivo de que el usuario pueda observar cuanto pasa por cada rama.

Al inicializar el sistema, el usuario asigna una referencia a los tanques secundarios por medio de la interfaz IoT la cual envía el valor asignado al microprocesador de nivel y este lo distribuye al microcontrolador delegado a los actuadores. A continuación, se activa la bomba permitiendo el llenado de los tanques principales; cuando estos alcanzan un nivel superior a su par secundario, el controlador modifica la apertura de la servo-válvula lo que permite regular el llenado en los tanques secundarios y evidenciar el funcionamiento completo del sistema.

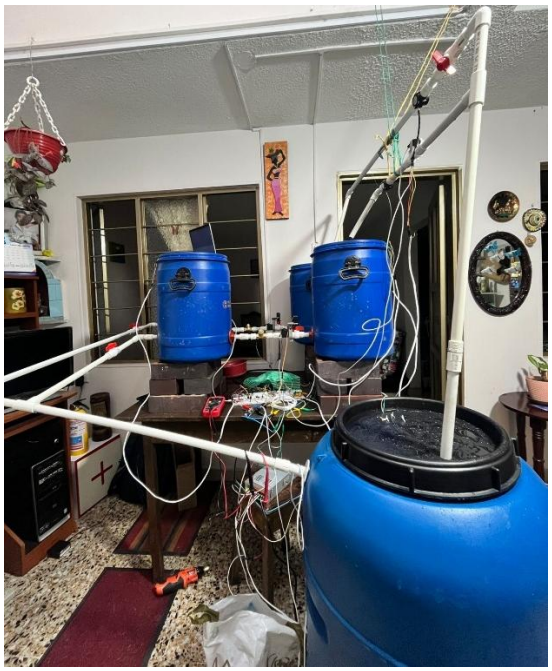


Imagen 15. Prototipo a escala. Autoría propia.

6.3 Comparación del funcionamiento del prototipo con el concepto técnico de la empresa Sanitarias e hidráulicas Manuel Rincon S.A.S.

Luego de la puesta en marcha, se comprobó el funcionamiento del sistema en función del almacenamiento y la distribución, de tal manera que el sistema responde fielmente al concepto otorgado por los trabajadores pertenecientes a la empresa *Sanitarias e hidráulicas Manuel Rincon S.A.S.* Además, los resultados experimentales demuestran la robustez del controlador a pesar de que el modelo simulado no refleja completamente la dinámica del sistema. Esto se debe a la simplificación del modelo matemático empleado que no considera factores físicos como pérdidas o no linealidades.

7. CONCLUSIONES

El desarrollo de este prototipo a escala permite concluir que:

- Al consultar sobre las tres topologías de conexión del modelo a escala con los trabajadores de la empresa Sanitarias e Hidráulicas Manuel Rincon S.A.S, que cuenta más de 30 años de experiencia en el sector de instalaciones hidráulicas, manifiestan que el *modelo paralelo* es el más veloz para el llenado de cada tanque individual, mientras que el *modelo serie* es más lento para llenarse y más veloz para desocuparse. No obstante, en términos de distribución, si se implementan los modelos sin recirculación, el *modelo paralelo* tendría un único punto de destino para cada contenedor de almacenamiento; de otra manera, el *modelo serie*, tiene un único fin para los 4 almacenadores de líquido, lo que incrementa la capacidad de almacenamiento para un único punto. Por último, se hace referencia al *modelo mixto*, que pese a no ser tan veloz como el *modelo paralelo*, tiene mejor disposición para el doble de capacidad para dos puntos de distribución cuando no se tiene en cuenta la recirculación.

  De acuerdo a lo anterior, la selección del modelo determina que la dinámica de un sistema hidráulico es la base fundamental para el desarrollo de un controlador de nivel, sin embargo, a partir de las funciones de transferencia de cada uno de los modelos y lo mencionado por la empresa de hidráulica, se evidencia que para sistemas en serie, la dinámica del sistema es más lenta debido al orden del polinomio representativo—que es dependiente de la cantidad de almacenadores conectados en serie— lo que se ve reflejado en una dependencia consecuente desde el último almacenador hasta el primero, con lo cual se identifica al modelo serie como el modelo con menor relevancia para el almacenamiento y distribución de agua.

  Sumado a lo anterior, la similitud entre la planta real, correspondiente al modelo mixto, y su modelo matemático se limita por las características no lineales del modelo real. Por lo tanto, la identificación de la dinámica a partir del análisis de la curva de reacción de Ziegler-Nichols contiene únicamente el comportamiento lineal del sistema lo cual permite la implementación de controladores tradicionales.

- Aunque controladores avanzados como MPC e IMC mostraron mayor robustez y mejor tiempo de respuesta en comparación con el PID, su dependencia de un modelo matemático de alta precisión y la mayor complejidad en su sintonización y ajuste los hacen menos viables para la aplicación en el prototipo. Esto se contrasta con el controlador PID, cuya sintonización puede realizarse de forma más directa y práctica a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto mediante métodos como Ziegler-Nichols.

  Por consiguiente, la implementación del controlador PID depende directamente de la precisión de los dispositivos de medición que forman parte del lazo de control, pues el sistema opera bajo la limitación de su comportamiento lineal debido al análisis por curva de reacción. En este contexto, la linealización de los sensores se convierte en un aspecto crucial

para el desarrollo de un controlador fiable. Los resultados mostraron que el proceso de linealización del sensor de caudal incrementó su exactitud en un 42.95% y el medidor de nivel solo mostró un leve incremento de 0.09%. A pesar de estas limitaciones de precisión en la medición de nivel, el actuador que regula el flujo demostró la capacidad de respuesta necesaria para seguir adecuadamente el set-point, incluso ante perturbaciones gracias a la velocidad inherente del proceso.

- La evaluación del sistema de control, basada en los sensores linealizados vinculados a las variables de nivel y caudal, permite verificar que el prototipo presenta un tiempo de respuesta 15244 segundos menor al observado en la simulación, evidenciando un desempeño más rápido en las pruebas experimentales gracias a la respuesta dinámica del actuador frente a la simulación del actuador en conjunto con la planta del sistema con el valor de la resistencia hidráulica. En consecuencia, el actuador que regula el flujo demostró tener la capacidad de respuesta necesaria para seguir adecuadamente el set-point incluso ante perturbaciones debido a que el sistema de almacenamiento tiene una constante de tiempo elevada (producto de la resistencia hidráulica) lo cual aporta estabilidad a la dinámica de nivel.

  De este modo, al considerarse la implementación del prototipo de manera práctica en la Finca San José, los administradores de la edificación tomarían decisiones informadas basadas en la medición de nivel realizada en momentos de aforo máximo, por lo cual el sistema daría una respuesta oportuna ante la necesidad de distribuir grandes volúmenes de agua mientras se realiza el control de nivel deseado en los almacenadores; adicionalmente, en situaciones críticas en las que se requiera un mantenimiento preventivo por limpieza en los almacenadores, el sistema podría operar de manera continua de tal forma que mantenga constante el suministro de agua.

  Para finalizar, se concluye que al realizar el prototipo y ponerlo en marcha, se comprueba que el sistema funciona como lo mencionaron los asesores de la empresa de hidráulica; demostrando que el almacenamiento y distribución de agua con toma de decisiones informadas puede ser implementado a mayor escala teniendo en cuenta sensores de nivel con una alta precisión que sean compatibles con el tipo de microcontrolador seleccionado. Adicionalmente, el actuador debe ser dimensionado en función del tamaño de la tubería con la que se interconecten los tanques ya que entre mayor sea el diámetro de esta, mayor debe ser el torque del actuador eléctrico y, por consiguiente, aumenta su tensión de alimentación.

8. ANEXOS

Anexo 1 – Función de transferencia del modelo Serie

Anexo 2 – Linealización de sensor HC-SR04

Anexo 3 – Linealización de sensor YF-S201

Anexo 4 – Códigos

Anexo 5 – Diseño Electrónico

Anexo 6 – Resistencia Hidráulica

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. Jaramillo y L. Gómez, «Conoce, en detalle, el articulado del POT radicado ante el Concejo de Bogotá,» 10 Septiembre 2021. [En línea]. Available: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/pot-bogota-reverdece-2022-2035/articulado-del-pot-bogota-reverdece-2022-2035. [Último acceso: 20 Marzo 2024].

[2] Secretaría de Movilidad, «Observatorio de Movilidad,» Secretaría de Movilidad, 2019. [En línea]. Available: https://observatorio.movilidadbogota.gov.co/movilidad-en-cifras/encuestas-de-movilidad. [Último acceso: 16 Marzo 2024].

[3] L. Zarza, «¿Cuáles son los usos del agua?,» iagua, 2022.

[4] S. Arroyave, «Colombia, un país donde el agua abunda pero no llega a los hogares,» La Silla Vacía, 22 Agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.lasillavacia.com/red-de-expertos/red-verde/colombia-un-pais-donde-el-agua-abunda-pero-no-llega-a-los-hogares/. [Último acceso: 11 Marzo 2024].

[5] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio,» 25 Julio 2023. [En línea]. Available: https://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/iniciamos-proyectos-de-agua-y-saneamiento-basico-en-24-departamentos-para-beneficiar-13-millones-de-personas-desatendidas-ministra-de-vivienda. [Último acceso: 5 Abril 2024].

[6] S. Grandas, «Así están los niveles de los embalses que abastecen de agua a Bogotá,» 11 Abril 2024. [En línea]. Available: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/asi-estan-los-niveles-embalses-que-abastecen-agua-potable-bogota-2024. [Último acceso: 18 Abril 2024].

[7] ONU-DAES, «The human right to water and sanitation,» United Nations Organization, 2015.

[8] Secretaria del Senado, «Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [CONSTITUCION_POLITICA_1991],» 31 Diciembre 2024. [En línea]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html#1. [Último acceso: 1 Marzo 2024].

[9] J. Rockström y T. Strauss, «7 datos sobre la crisis mundial del agua y la resiliencia hídrica que los líderes de la COP29 deben saber,» 26 Noviembre 2024. [En línea]. Available: https://es.weforum.org/stories/2024/11/7-datos-sobre-la-crisis-mundial-del-agua-y-la-resiliencia-hidrica-que-los-lideres-de-la-cop29-deben-saber/. [Último acceso: 28 Noviembre 2024].

[10] PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» Organización de las Naciones Unidas, [En línea]. Available:

https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/. [Último acceso: 4 Mayo 2024].

[11] PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), «Agua limpia y saneamiento,» Organización de las Naciones Unidas, [En línea]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/. [Último acceso: 4 Mayo 2024].

[12] PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), «Industria, innovación e infraestructura,» Organización de las Naciones Unidas, [En línea]. Available: https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/industria-innovacion-infraestructura. [Último acceso: 4 Mayo 2024].

[13] PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), «Producción y consumo responsables,» Organización de las Naciones Unidas, [En línea]. Available: https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/produccion-consumo-responsables. [Último acceso: 12 Noviembre 2024].

[14] A. Creus, Instrumentación Industrial, México D.F: Alfaomega, 2010.

[15] J. Vergara, R. Molina y C. Machado, «Prototipo para control automático de nivel y caudal de líquidos,» *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología,* nº 6, pp. 9-18, 2011.

[16] H. A. Baskhara, S. Anwar y Abdurahman, «Design of Water Level Monitoring using Ultrasonic Sensor,» *Journal of Physics: Conference Series,* p. 012001, 2021.

[17] A. Robles y J. Cifuentes, «Medidores de flujo,» 2021.

[18] B. Pereira, D. Moura, J. Pereira, M. Lellis, M. dos Santos y C. Simões, «Selection of Water Flow Sensors: An Approach using the PrOPPAGA Method,» *Procedia Computer Science,* vol. 230, pp. 641-650, 2023.

[19] A. Muntaser y N. Buaossa, «Coupled Tank Non-linear System; Modeling and Level Control using PID and Fuzzy Logic Techniques,» *arXiv,* 2021.

[20] W. Luyben, «Liquid level control: Simplicity and complexity,» *Journal of Process Control,* vol. 86, pp. 57-64, 2020.

[21] C. G. a. J. S. A. a. R. T. a. S. G. a. T. C. a. K. A. N. K. Babu, «An investigation of HMI based PLC - PID for automatic quality water distribution system,» de *2021 Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR)*, 2021.

[22] S. P. S. J., S. R., Y. A., V. B., S. M. y P. S., «Development of PLC Based Level Control System for Conical Tank System for Water Treatment Plant,» de *2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)*, 2023.

[23] J. Suarez, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS SCADA PARA AUTOMATISMOS, BASADOS EN HARDWARE Y SOFTWARE LIBRES,» Pereira, 2015.

[24] EBAC, «¿Qué es SketchUp y cómo usarlo?,» 1 Junio 2023. [En línea]. Available: https://ebac.mx/blog/que-es-sketchup. [Último acceso: 3 Febrero 2025].

[25] SketchUp, «SketchUp,» [En línea]. Available: https://app.sketchup.com/app. [Último acceso: 12 Marzo 2025].

[26] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, vol. 3, México: Pearson Educación, 1997.

[27] A. M. R. Ruelas, J. Q. Ccorimanya, Y. Iano, M. A. Q. Barra, M. A. R. Gonzales y M. E. V. Vilca, «Comparative Study of PI and PID Controls with Kalman Filter Implemented for Water Level Control Based on Matlab and Factory I/O,» de *Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21)*, 2022.

[28] N. I. Septiani, I. Bayusari, Caroline, T. Haiyunnisa y B. Y. Suprapto, «Optimization of PID control parameters with genetic algorithm plus fuzzy logic in stirred tank heater temperature control process,» de *2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, Palembang, 2017.

[29] I. LANDAU, M. Tomizuka y D. AUSLANDER, Adaptive Systems in Control and Signal Processing 1983, 1983.

[30] D. Hooda y V. Raich, Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control : An Introduction, Alpha Science International, 2016.

[31] S. Castaño, «Acción de Control Derivativo – Control PID,» [En línea]. Available: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/accion-de-control-derivativo-control-pid/. [Último acceso: 12 Septiembre 2025].

[32] A. Kadu, S. Bhosale, A. Pagare, P. Sable, R. Kudtarkar y A. Bhilare, «Development of Low-Cost Water Level Monitoring and Control using PID Controller,» de *2023 3rd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, Bengaluru, 2023.

[33] S. Shukla y U. C. Pati, «Implementation of Different Control Strategies on a Quadruple Tank System,» de *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, 2019.

[34] A. A. a. R. M. H. F. a. M. N. N. a. M. M. H. a. T. M. N. a. A. M. F. Azman, «Modeling and comparative study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) tuning method for Multi-tube aluminum sulphate water filter (MTAS),» de *2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, Kota Kinabalu, 2017.

[35] H. Zhang y E. Prempain, «Non-linear Model Predictive Control of a Quadruple-Tank Process,» de *2022 UKACC 13th International Conference on Control (CONTROL)*, Plymouth, 2022.

[36] L. Phan, K. Do y T. Nguyen, «Review of hydrogen technologies based microgrid: Energy management systems, challenges and future recommendations,» *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 48, nº 38, pp. 14127-14148, 2023.

[37] P. Keadtipod y D. Banjerdpongchai, «Supervisory Robust Model Predictive Control for Linear Systems Subject to Parametric Uncertainty and Application to Level Control Process,» de *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Rai, 2018.

[38] N. N. Parekar, C. Kadu y B. Parvat, «Modified MRAC for Controlling Water Level of Boiler System,» de *2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, Jabalpur, 2015.

[39] C. a. F. X. a. X. L. a. G. C. Liu, «Constant Current Water Supply System Design Based on Fuzzy PID Control,» de *2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP)*, Xi'an, 2021.

[40] L. a. D. W. Li, «Optimization control strategy of boiler water level based on fuzzy PID,» de *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yinchuan, 2016.

[41] D. L. a. M. S. R. a. C. K. K. Mute, «Internal model based PI controller design for the coupled tank system: An experimental study,» de *2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, Kolkata, 2016.

[42] Y. Vered y S. Elliot, «Robust internal model control approach for position control of systems with sandwiched backlash,» *Mechatronics,* vol. 102, nº 0957-4158, p. 103195, 2024.

[43] Ó. García, A. Vidal y A. Aparicio, Prácticas de Sistemas de Control - Continuos y Discretos, Universidad Miguel Hernández, 2017, p. 62.

[44] S. Biswanath, Introduction to Digital Control, vol. 1, Statesboro: Springer Cham, 2024.

[45] K. Ogata, Sistemas de Control en Tiempo Discreto, vol. 2, Naucalpan: Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1996, p. 228.

[46] MasterClass, «Matriz de Pugh para la resolución de problemas: Cómo crear una matriz de decisiones,» 6 Junio 2022. [En línea]. Available: https://www.masterclass.com/articles/pugh-matrix. [Último acceso: 12 Agosto 2025].

[47] MathWorks, «MATLAB,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/products/matlab.html. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[48] MathWorks, «The MathWorks Logo Is an Eigenfunction of the Wave Equation,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/company/technical-articles/the-mathworks-logo-is-an-eigenfunction-of-the-wave-equation.html. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[49] MathWorks, «System Identification Toolbox,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/products/sysid.html. [Último acceso: 16 Junio 2025].

[50] IBM, «¿Qué es un microcontrolador?,» 4 Junio 2024. [En línea]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/microcontroller. [Último acceso: 12 Septiembre 2025].

[51] Espressif Systems, «ESP32-DevKitM-1 User Guide,» [En línea]. Available: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp32-devkitm-1/user_guide.html. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[52] Arduino, «What is Arduino?,» 05 Febrero 2018. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/. [Último acceso: 12 Septiembre 2025].

[53] Arduino, «Software,» [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/en/software/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[54] F. Figueroa, «SENSOR DE NIVEL POR ELECTRODOS,» 27 Abril 2018. [En línea]. Available: https://sensoricx.com/mediciones/transmisor-de-nivel-electrodos/#google_vignette. [Último acceso: 12 Septiembre 2025].

[55] FGT, «Explicación del medidor de flujo de turbina | Operación y calibración,» 2 Agosto 2022. [En línea]. Available: https://www.fgttw.com/es/technology-news/turbine-flow-meter-explained-operation-and-calibration/. [Último acceso: 13 Septiembre 2025].

[56] Metrólogos Asociados, «La Guía MetAs,» [En línea]. Available: https://www.metas.com.mx/guiametas. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[57] Microcontrollerslab, «MG995 Servo Motor Pinout, Interfacing with Arduino, Features & Examples,» [En línea]. Available: https://microcontrollerslab.com/mg995-servo-motor-pinout-interfacing-with-arduino-features-examples/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[58] Radio Cartagena, «Premian a una alumna de la UPCT por su sistema de monitorización de grúas del puerto,» Cadena SER, 23 Enero 2025. [En línea]. Available: https://cadenaser.com/murcia/2025/01/23/premian-a-una-alumna-de-la-upct-por-su-sistema-de-monitorizacion-de-gruas-del-puerto-radio-cartagena/?utm_source=chatgpt.com. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[59] Amazon Web Services, «FreeRTOS,» [En línea]. Available: https://aws.amazon.com/es/freertos/. [Último acceso: 18 Agosto 2025].

[60] IBM, «Internet de las cosas (IoT),» [En línea]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/topics/internet-of-things. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[61] SAP, «¿Qué es IoT y cómo funciona?,» SAP, [En línea]. Available: https://www.sap.com/latinamerica/products/technology-platform/what-is-iot.html. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[62] IBM, «Protocolos TCP/IP,» 27 Agosto 2024. [En línea]. Available: https://www.ibm.com/docs/es/aix/7.2.0?topic=protocol-tcpip-protocols. [Último acceso: 10 Noviembre 2025].

[63] Amazon Web Services, «¿Qué es IoT (Internet de las cosas)?,» [En línea]. Available: https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/. [Último acceso: 18 Septiembre 2025].

[64] SIEMENS, «Automatización del diseño electrónico,» [En línea]. Available: https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/electronic-design-automation-eda/. [Último acceso: 18 Septiembre 2025].

[65] N. P, C. B. Subramanian, B. N. K. Reddy, L. M. Reddy, G. G. Reddy y C. Y. Reddy, «Smart Water Controller in Metro Water Supply Lines Using Ultrasonic Sensor and Flow Sensor,» de *2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*, Namakkal, 2023.

[66] P. B. Agarkar, A. V. Dange, T. K. Adhav, N. Sangle y N. D. Kapale, «Efficient Water Resource Management: An IoT-Based Smart Water Level Monitoring and Control System,» de *2023 4th International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM)*, Dubai, 2023.

[67] Espressif Systems, «ESP32 Series of SoCs,» [En línea]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[68] Ingeniería Mecafenix, «Sensores Ultrasónicos,» 1 Junio 2021. [En línea]. Available: https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/ultrasonico/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[69] Isaac, «HC-SR04,» [En línea]. Available: https://www.hwlibre.com/hc-sr04/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[70] S. Castaño, «Sensor de Flujo YF-S201: Medición de Caudal con Arduino,» [En línea]. Available: https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-embebidos/arduino/sensor-de-flujo-yf-s201-medicion-de-caudal-con-arduino/. [Último acceso: 14 Septiembre 2025].

[71] Electronica Made, «Caudalímetro con Arduino YF-S201,» [En línea]. Available: https://electronicamade.com/caudalimetro-con-arduino/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[72] Ingeniería Mecafenix, «Servomotor,» 8 Noviembre 2022. [En línea]. Available: https://www.ingmecafenix.com/electronica/motores-electronicos/servomotor/#google_vignette. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[73] KiCad, «KiCad,» [En línea]. Available: https://www.kicad.org/. [Último acceso: 14 Septiembre 2025].

[74] Blynk, «Blynk,» [En línea]. Available: https://blynk.io/. [Último acceso: 5 Septiembre 2025].

[75] C. Borja-Vega, d. K. Groot y H. A. Serrano, «Colombia UN CAMBIO DE RUMBO Seguridad hídrica para la recuperación y crecimiento sostenible,» 1 Septiembre 2020. [En línea]. Available: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/212231615975980795. [Último acceso: 25 Febrero 2024].

[76] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Rendición de Cuentas 2023,» Ministerio de Vivienda, Ciudad Y Territorio, 2023.

[77] W. Amaya, Ó. Cañón y Ó. Avilés, «CONTROL DE pH PARA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES,» Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2004.

[78] A. Soni, K. Singh y P. Kumar, «Smart Water Purification Technique,» de *2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, 2020.

[79] U. Sarfraz, S. I. Ali Shah, M. Muhammad Awais y S. Nawaz, «Automatic pH control for anaerobic bacteria of wastewater treatment of paper and pulp industry,» de *2022 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 2022.

[80] S. A. Binti Makhtar, N. Binti Burham y A. B. Abdul Aziz, «Design and Implementation of Real Time Approach for The Monitoring of Water Quality Parameters,» de *2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, 2022.

[81] J. P. Sembiring, E. Pranita, N. U. Putri, A. Jayadi y R. Fadli, «Water Quality Control and Monitoring Systems in VANAME Shrimp Ponds Using the Fuzzy Method,» de *2023 International Conference on Networking, Electrical Engineering, Computer Science, and Technology (IConNECT)*, 2023.

[82] R. Dong, W. Wu, F. Liu, J. Li, H. Xu, J. Li y J. Fu, «Study on Remote Control System of Rural Water Treatment Equipment Based on Labview,» de *2018 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*, 2018.

[83] J. Palacios Moya y C. Reyes Muñoz, «Sistema de señalización, diseño y control para sedimentador y automatización de desarenador en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Tunja,» Universidad Santo Tomás, Tunja, 2020.

[84] A. Kamboj, P. Garg, D. Bansal, A. Sankar y M. Bukya, «Development of Android App-based Portable Water Quality Testing Device using Arduino,» de *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 2021.

[85] D. Lequesne, Practical PID Handbook, Francia: EDP Sciences, 2022, p. 142.

[86] A. Mandal, Introduction to Control Engineering, Kolkata: New Age International Ltd, 2006, p. 107.

[87] ESP Boards, «ESP32-DevKit-V1,» [En línea]. Available: https://www.espboards.dev/esp32/esp32doit-devkit-v1/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].

[88] J. Vilcherrez, «¿Qué es un Caudalímetro?,» 2024. [En línea]. Available: https://flujometros-caudalimetros.com/. [Último acceso: 13 Marzo 2025].