



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“EVALUACIÓN DE SOLUCIONES ENFOCADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE
AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA
EMPRESA CIAUTO.”**

Proyecto de Propuesta Tecnológica presentado previo a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico.

Autor:

Patin Sanchez Cristian Manuel

Tutor Académico:

Ing. Secundino Marrero Ramírez. PhD

LATACUNGA – ECUADOR

2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Patin Sanchez Cristian Manuel, declaro ser autor de la presente propuesta tecnológica: **“EVALUACIÓN DE SOLUCIONES ENFOCADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA EMPRESA CIAUTO”**, siendo el Ing. Secundino Marreno Ramírez. PhD. tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo Tecnológico, son de mi exclusiva responsabilidad.



.....
Cristian Manuel Patin Sanchez

C.I. 172665877-4

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la siguiente propuesta tecnológica sobre el título:

“EVALUACIÓN DE SOLUCIONES ENFOCADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA EMPRESA CIAUTO”, del ponente: Patin Sanchez Cristian Manuel de la Carrera de **INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**, considero que dicho informe tecnológico cumple con los requisitos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero del 2025


.....
Ing. Secundino Marreno Ramirez. Ph.D.
C.I.175710790-7


APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN


En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Cristian Manuel Patin Sanchez con el título de Proyecto de Titulación: “**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES ENFOCADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA EMPRESA CIAUTO**”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación de Proyecto.

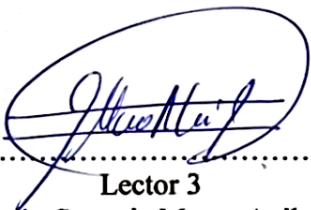
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero del 2025

Para constancia firman


.....
Lector 1 (Presidente)
Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.
C.I. 050234776-8


.....
Lector 2
Ing. Franklin Vázquez Tenelema M.Sc.
C.I. 171043449-7


.....
Lector 3
Ing. León Segovia Marco Anibal M.Sc.
C.I. 050230540-2

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este camino académico y personal.

A mi familia, por su respaldo incondicional y su fe en mis capacidades. A Rigoberto Medina, por su guía, por ser un modelo de esfuerzo, perseverancia y compromiso. A Silvia Sanchez, por su amor, su apoyo inquebrantable y por enseñarme que con dedicación y determinación se pueden superar todas las adversidades. A mis hermanos, por su cariño, apoyo y por ser una fuente constante de motivación.

A mis amigos, quienes, con su compañía, ánimo y comprensión hicieron que este camino fuera más llevadero. Su apoyo ha sido invaluable en cada desafío enfrentado.

*A mis docentes, por compartir su conocimiento y experiencia, por inspirarme a buscar la excelencia y por brindarme las herramientas necesarias para afrontar los desafíos del mundo profesional. A mi tutor, al **Ing. Secundino Marreno Ramírez. PhD** por su orientación, paciencia y exigencia académica, elementos clave en la culminación de esta investigación. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi desarrollo profesional.*

DEDICATORIA

*Quiero dedicar este trabajo de titulación a mi familia, el pilar fundamental de mi vida. A **Rigoberto Medina**, a quien considero mi padre y quien ha sido mi guía y ejemplo de integridad y perseverancia. Su apoyo incondicional y sus enseñanzas han sido claves en mi formación. A **Silvia Sanchez**, mi madre, por su amor infinito, su paciencia y su incansable dedicación, que me han impulsado a superar cada obstáculo con determinación.*

A mis hermanos, compañeros de vida y cómplices en este camino, cuyo apoyo, cariño y palabras de aliento han sido una fuente constante de motivación.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado en cada desafío, compartiendo alegrías y brindándome su apoyo incondicional en los momentos más exigentes.

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, han formado parte de este proceso, dejando una huella en mi crecimiento personal y profesional.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto tecnológico cuyo título versa “**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES ENFOCADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA EMPRESA CIAUTO.**” presentado por: **Patin Sanchez Cristian Manuel** egresado de la Carrera de: **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 18 de febrero del 2025

Atentamente,

Mg. Lidia Rebeca Yugla Lema
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502652340



CENTRO
DE IDIOMAS

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	1
2.1. EL PROBLEMA.....	1
2.1.1. Situación Problemática.....	2
2.1.2. Formulación del problema.....	2
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	3
2.2.1. Objeto:.....	3
2.2.2. Campo de acción para el proyecto:	3
2.3. BENEFICIARIOS	3
2.3.1. Beneficiarios directos:.....	3
2.3.2. Beneficiarios indirectos:.....	3
2.4. JUSTIFICACIÓN	3
2.5. OBJETIVOS.....	4
2.5.1. Objetivo General.....	4
2.5.2. Objetivos Específicos.....	4
2.6. TAREAS POR OBJETIVO	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA.....	5
3.1. ANTECEDENTES.	5
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
3.3. SISTEMAS DE CONTROL	7
3.3.1. Control en lazo abierto	8
3.3.2. Control en lazo cerrado	9
3.3.3. Control en lazo cerrado en comparación con control en lazo abierto.....	12
3.3.4. Medición de nivel de agua.....	13
3.3.5. Control ON- OFF.....	15
3.3.6. Control PID.....	17

3.3.6.1.	Características del control PID	18
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	21
4.1.	DECLARACIÓN DE VARIABLES	21
4.2.	ESTADO ACTUAL DE LA PLANTA	21
4.2.1.	Proceso del tratado de agua	22
4.2.2.	Sistema de llenado actual de tanques	23
4.3.	MODELADO MATEMÁTICO DE UN TANQUE.....	29
4.4.	MEDIDOR ULTRASÓNICO	32
4.4.1.	Características	33
4.4.2.	Ventajas	33
4.4.3.	Desventajas	33
4.4.4.	Magnitud de entrada.....	34
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	36
5.1.	Modelo matemático del sistema de llenado	36
5.2.	CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS.....	39
5.3.	SIMULACIÓN DE CONTROL PI	41
5.4.	COMPARACIÓN CONTROL ON- OFF CON HISTÉRESIS Y PI	42
5.5.	MATERIALES Y PRESUPUESTO.....	44
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
6.1.	CONCLUSIONES.....	47
6.2.	RECOMENDACIONES	48
7.	BILBIOGRAFÍA	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de la investigación.	7
Figura 2. Diagrama Esquemático de un sistema de control de lazo abierto.....	8
Figura 3. Diagrama Esquemático de un sistema de control de lazo cerrado.....	9
Figura 4. Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado.	10
Figura 5. Esquema simplificado de una realimentación unitaria.	11
Figura 6. Sistema en lazo cerrado.	11
Figura 7. Tanque con sistemas de medición	13
Figura 8. Sensor de nivel de líquido ultrasónico	15
Figura 9. Teoría del control ON-OFF.	16
Figura 10. Diagrama de bloques de un control PID	18
Figura 11. Salida del proceso de control proporcional.....	19
Figura 12. Salida del proceso de control integral al control proporcional.	20
Figura 13. Salida del proceso de control derivativo.....	20
Figura 14. Estado actual de la planta de agua en la fábrica CIAUTO.	22
Figura 15. Diagrama de flujos del proceso de tratado de agua.....	23
Figura 16. Estado actual del control de nivel de llenado de cada tanque.....	24
Figura 17. Tanque instalado actualmente en CIAUTO.....	24
Figura 18. Medidas generales de un tanque de agua.....	25
Figura 19. Bombas hidráulicas para la planta de tratamiento de agua.....	25
Figura 20. Lámpara UV VIQUA- S950RL 2	26
Figura 21. Sistema de Osmosis.....	27
Figura 22. Funcionamiento de la electroválvula para el agua clarificada.	28
Figura 23. Sistema completo de la planta de tratamiento de agua (sistema interactivo). .	30
Figura 24. Sistema agua blanda (sistema interactivo).....	31
Figura 25. Medición de nivel en líquidos SITRANS LU150.	32
Figura 26. Datos de la variable de entrada para SITRANS LU150.....	34
Figura 27. Medición de nivel en el tanque de aguas residuales con SITRANS LU150 ...	35
Figura 28. Conexión inalámbrica con smartphones/tabletas.	35
Figura 29. Representación en Simulink de la primera ecuación.....	37
Figura 30. Representación en Simulink de la segunda ecuación.	38
Figura 31. Representación en Simulink de la tercera ecuación.	38
Figura 32. Esquema del Sistema en Simulink de los Tanque 1, Tanque 2 y Tanque 3	39
Figura 33. Diagrama del Control ON-OFF con histéresis.....	40
Figura 34. Respuesta ON-OFF con histéresis.....	40
Figura 35. Diagrama del Control PI con perturbación.	41
Figura 36. Respuesta de control PI del sistema con perturbación.	41
Figura 37. PI vs ON-OFF con histéresis PV	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las bombas hidráulicas.....	26
Tabla 2. Variables	30
Tabla 3. Presupuesto	45

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

TITULO: “PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA BLANDA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA EMPRESA CIAUTO.”

Autor: Cristian Manuel Patin Sanchez

RESUMEN

La evaluación de soluciones enfocadas a la automatización y mejoramiento del sistema de bombeo de agua blanda en la planta de tratamiento de agua de la empresa CIAUTO, situada en Ambato, Ecuador. Actualmente, el sistema opera de manera manual, lo que genera ineficiencias significativas en la gestión y distribución del agua, además de un consumo energético elevado. Esta situación se traduce en problemas como el desabastecimiento o el sobrellenado de los tanques, afectando no solo la producción, sino también la calidad del suministro. En primer lugar, se realiza una recolección exhaustiva de datos técnicos sobre el sistema existente, que incluye un análisis detallado de las características de los tanques, bombas y tuberías. A partir de esta información, se lleva a cabo un modelado matemático del sistema de tanques, considerando las dinámicas de entrada y salida de agua. Posteriormente, se simulan los modelos de control PI y ON-OFF utilizando herramientas como MATLAB y Simulink, evaluando su desempeño en diferentes escenarios operativos. El problema central radica en que el sistema de bombeo, al funcionar de manera manual y depender de un control de los operarios de la fábrica, incrementa el riesgo de errores humanos y dificulta la supervisión en tiempo real, con la investigación respectiva como resultados obtenidos demuestran que la implementación del sensor ultrasónico que permitirá un monitoreo preciso y en tiempo real del nivel de agua, facilitando la supervisión remota a través de dispositivos móviles en la planta y posicionando a la empresa CIAUTO como un referente en el manejo eficiente del agua.

Palabras clave: Automatización, Bombeo, Control PI, Sensor ultrasónico, Eficiencia energética.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

TITLE:” PROPOSAL FOR THE AUTOMATION OF THE SOFT WATER PUMPING SYSTEM IN THE WATER TREATMENT PLANT AT CIAUTO COMPANY. ”

Author: Cristian Manuel Patin Sanchez

ABSTRACT

The evaluation of solutions focused on the automation and improvement of the soft water pumping system at the CIAUTO water treatment plant, located in Ambato, Ecuador. Currently, the system operates manually, which generates significant inefficiencies in water management and distribution, in addition to high energy consumption. This situation results in problems such as shortages or overfilling of tanks, affecting not only production but also the quality of supply. First, an exhaustive collection of technical data on the existing system is carried out, including a detailed analysis of the characteristics of the tanks, pumps and piping. From this information, a mathematical modeling of the tank system is carried out, considering the inlet and outlet water dynamics. Subsequently, PI and ON-OFF control models are simulated using tools such as MATLAB and Simulink, evaluating their performance in different operating scenarios. The central problem lies in the fact that the pumping system, by operating manually and depending on the control of the factory operators, increases the risk of human error and hinders real-time monitoring, with the respective research as results obtained show that the implementation of the ultrasonic sensor that will allow an accurate and real-time monitoring of the water level, facilitating remote monitoring through mobile devices in the plant and positioning the company CIAUTO as a reference in the efficient management of water.

Keywords: Automation, Pumping, PI control, Ultrasonic sensors, Energy efficiency.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Propuesta de automatización del sistema de bombeo de agua blanda en la planta de tratamiento de agua en la empresa CIAUTO.

Fecha de inicio: Abril del 2024

Fecha de finalización: Febrero 2025

Lugar de ejecución: Parroquia de Unauncho -Cantón Ambato – Provincia de Tungurahua.

Facultad: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera: Carrera de Ingeniería en Electricidad.

Proyecto de investigación vinculado: Desarrollo de sistemas PI para la mejora al monitoreo y control de los tanques de agua.

Tutor de Titulación: Ing. Secundino Marrero Ramírez. PhD

Estudiante: Patin Sanchez Cristian Manuel

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesionales Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Procesos Industriales, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Automatización y control de sistemas eléctricos en el sector productivo y los servicios.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA

El sistema de bombeo de agua en la fábrica de autos CIAUTO opera de manera manual, lo que genera ineficiencias en la gestión y distribución del agua en los procesos de producción. Actualmente, los operadores activan las bombas y válvulas sin un monitoreo en tiempo real del nivel de los tanques, lo que puede provocar desabastecimiento o sobrellenado, afectando la producción y el consumo energético. Además, el controlador ON-OFF utilizado no es adecuado para regular de manera eficiente el flujo de agua.

2.1.1. Situación Problemática

Actualmente, la planta de tratamiento de agua de la empresa CIAUTO opera su sistema de bombeo de agua blanda de forma manual, lo que genera ineficiencias en el proceso. Los operadores deben realizar tareas repetitivas que consumen tiempo y reducen la productividad general de la planta. Además, la ausencia de un monitoreo en tiempo real incrementa el riesgo de errores humanos, como imprecisiones en la regulación del nivel de agua, lo que puede afectar la calidad del suministro y el funcionamiento de los equipos.

El sistema de bombeo de agua de la empresa abastece tres procesos clave: agua clarificada, agua blanda y agua desmineralizada. Sin embargo, la falta de automatización impide un control óptimo del nivel de los tanques y la distribución eficiente del agua. Actualmente, el sistema opera con un controlador ON-OFF que requiere intervención manual constante, lo que no solo aumenta la carga de trabajo del personal, sino que también genera inconsistencias en el suministro de agua. Estas deficiencias pueden ocasionar fallas en los procesos productivos, desperdicio de agua y un mayor consumo energético.

El uso de controles manuales también implica un mayor consumo energético y costos operativos elevados debido a la falta de optimización en el uso de los recursos. Además, el sistema actual no se adapta automáticamente a las variaciones en la demanda, lo que genera desperdicio de agua y afecta la sostenibilidad del proceso. Para solucionar estos problemas, se requiere un sistema de control automatizado basado en PI, que permita optimizar el bombeo, mejorar la eficiencia operativa y garantizar un monitoreo preciso en tiempo real. La implementación de esta solución reducirá la intervención manual, minimizará el desperdicio de agua y mejorará la estabilidad del sistema, asegurando una operación eficiente y sostenible dentro de la planta.

2.1.2. Formulación del problema

El sistema de bombeo de agua en la fábrica de autos no está automatizado y requiere la activación manual por parte de los trabajadores, lo que genera ineficiencias en la operación y dificulta el monitoreo en tiempo real del nivel de los tanques. La falta de un sistema de control adecuado provoca inconsistencias en el suministro de agua, un mayor consumo energético y una carga de trabajo innecesaria para el personal. Para mejorar la eficiencia operativa y optimizar la gestión del agua, es necesario diseñar e implementar un modelo de control PID que automatice el sistema de bombeo, garantice un monitoreo preciso en tiempo real y reduzca la intervención manual.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.2.1. Objeto:

Control de nivel de llenado de tanques de agua con el modelo de control PI en la empresa CIAUTO.

2.2.2. Campo de acción para el proyecto:

3311 tecnología de la instrumentación / 331101 Tecnología de Automatización.

2.3. BENEFICIARIOS

2.3.1. Beneficiarios directos:

Los beneficiarios directos de esta investigación son: Directivos y técnicos de la empresa CIAUTO.

2.3.2. Beneficiarios indirectos:

Los beneficiarios indirectos de esta investigación incluyen: Operarios y clientes.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La optimización y automatización de procesos en la industria es un factor clave para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y garantizar la calidad en la producción. En la fábrica de autos CIAUTO, el sistema de bombeo de agua juega un papel fundamental en los procesos de agua clarificada, agua blanda y agua desmineralizada. Sin embargo, la falta de automatización en el control del nivel de los tanques y la dependencia de un sistema manual basado en controladores ON-OFF han generado problemas como desperdicio de agua, un mayor consumo energético y una carga de trabajo innecesaria para el personal.

Desde un enfoque tecnológico, esta investigación es relevante porque demuestra la viabilidad de implementar un sistema de control avanzado en la industria automotriz, aprovechando herramientas de simulación como MATLAB y Simulink para diseñar y evaluar el desempeño del modelo PI. Asimismo, desde un punto de vista práctico, la propuesta permitirá a la empresa mejorar su capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda de agua, minimizando costos y asegurando un suministro continuo y eficiente.

En este sentido, el presente estudio no solo busca resolver una problemática específica dentro de la fábrica, sino que también puede servir como referencia para otras industrias con necesidades similares de automatización en la gestión de recursos hídricos.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo General

Realizar una propuesta de automatización para el sistema de control de nivel en los tanques de agua blanda en la planta de tratamiento de agua en la fábrica de autos CIAUTO con el fin de mejorar la eficiencia operativa y el control del proceso

2.5.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información de todo el sistema actual en la planta de tratamiento de agua.
- Realizar la modelación del sistema de llenado de tanques con fines de control a partir de las características del proceso.
- Evaluar el desempeño del sistema de control con diferentes algoritmos de control en lazo cerrado.

2.6. TAREAS POR OBJETIVO

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES (TAREAS)	RESULTADOS ESPERADOS	TÉCNICAS, MEDIOS E INSTRUMENTOS
Recopilar información de todo el sistema actual en la planta de tratamiento de agua.	<ul style="list-style-type: none"> -Identificar las características del sistema de bombeo actual. - Analizar los métodos de control utilizados y registrar los niveles de agua en los tanques y su variabilidad. 	Diagnóstico detallado del estado actual del sistema de bombeo y sus limitaciones.	Observación directa, entrevistas con el personal de operación, revisión de documentos técnicos.
Realizar la modelación del sistema de llenado de tanques con fines de control a partir de las características del proceso.	<ul style="list-style-type: none"> - Diseñar la función de transferencia del sistema. - Implementar el modelo de control PI en Simulink. - Ajustar los parámetros del controlador PI. - Realizar pruebas de simulación para evaluar el comportamiento del sistema. 	Modelo simulado del sistema de bombeo con control PI, optimizado y ajustado para mejorar la estabilidad del nivel de los tanques.	Software MATLAB y Simulink, ecuaciones de modelado matemático, referencias bibliográficas sobre control PI.
Evaluar el desempeño del sistema de control con diferentes algoritmos de control en lazo cerrado.	<ul style="list-style-type: none"> - Comparar la respuesta del control ON-OFF y control PI. - Analizar la estabilidad y rapidez del sistema en diferentes condiciones de operación. - Evaluar la reducción de intervención manual y consumo energético. 	Validación de la mejora en la eficiencia operativa del sistema con el control PI en comparación con el sistema ON-OFF.	Análisis de datos de simulación, gráficos de respuesta del sistema, métricas de desempeño del PI como tiempo de respuesta y error en estado estable.

3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

3.1. ANTECEDENTES.

CIAUTO, “La Ciudad del Auto” es una empresa 100% ecuatoriana ubicada en la provincia de Cotopaxi, aquí nace de una visión empresarial comprometida con el Ecuador, impulsando la generación de trabajo en el centro del país. Inició sus operaciones en febrero del 2013 fabricando vehículos de la marca Great Wall Motors, uno de los mayores productores de vehículos asiáticos. Cuenta con la planta de fabricación de autos más moderna del Ecuador con líneas de soldadura, pintura, vestidura final y pista de pruebas dinámicas, ha logrado cifras récord de incorporación de autopartes producidas en el Ecuador incorporando muchos autopartistas nuevos a su cadena productiva, generando trabajo y transferencia de tecnología en nuestro país [1].

En el diseño de un sistema automático de una planta de producción entra en juego las tecnologías de automatización, las prácticas, trabajo y las reglas comerciales que respaldan el diseño, estos sistemas ayudan a mejorar el rendimiento de trabajo dentro de las empresas [2]. A medida que la empresa ha crecido con un emblema de actividades de producción mayores, el crecimiento de la competencia y la demanda de exportación fuera del país, está evolucionando con la mejora de sus máquinas, equipos y herramientas dentro de ella.

En los últimos años, CIAUTO ha aumentado significativamente los niveles de automatización de sus procesos. Ha habido reformas significativas de los sistemas de control en todas las áreas, que han permitido una producción más rentable y eficiente. La nave de pintura posee un sistema de bombeo en la planta de agua que es indispensable en el uso continuo del agua desmineralizada, la circulación continua de esta agua tratada a través de cada proceso de limpieza y purificación sirve para varias aplicaciones clave debido a su pureza y la ausencia de minerales que puedan causar depósitos, corrosión o contaminación.

La empresa CIAUTO, es distribuidor oficial de GMW (vehículos livianos), en los últimos años sumó a su plataforma los productos de King Long (Van), Jmc (Camiones) y Zotye (Vehículos livianos) brindando así al cliente toda la gama de vehículos para diferentes gustos y necesidades del cliente. CIAUTO dentro de su estructura organizacional cuenta con varios departamentos que desempeñan sus funciones de manera correcta, que en el 2016 han hecho de la empresa de las primeras cinco en el sector automotor del país, pero dentro del departamento de mantenimiento el indicador de disponibilidad operacional de

la planta de pintura es del 100% cabe mencionar que tiene datos y parámetros muy poco definidos para su cálculo, además se sabe que aunque una empresa funcione de manera adecuada durante todo el tiempo de operación no se llega alcanzar dicho resultado, por lo que tentativamente se puede estimar que trabajan a una disponibilidad del 93% en toda la planta de pintura [3].

Con ello la necesidad de contar con sistemas automatizados y actualizados que ayuden a controlar y mejorar la eficiencia en la producción, lo cual se convierte en ahorro de tiempo, dinero y reducción de fallos y errores. Las decisiones están orientadas a la modernización y optimización de los sistemas operativos, mostrando la dedicación de la empresa a la excelencia en sus operaciones y su capacidad para adaptarse a las constantes demandas de un mercado en continuo cambio.

Además de su enfoque en la innovación y automatización, CIAUTO se destaca por su compromiso con la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico en la industria automotriz ecuatoriana. La empresa ha implementado estrategias para la reducción del impacto ambiental, optimizando el consumo de recursos como el agua y la energía dentro de sus procesos productivos. Asimismo, mantiene alianzas con proveedores nacionales e internacionales para fortalecer su cadena de suministro y garantizar altos estándares de calidad en sus productos. Su constante evolución y apuesta por la tecnología la posicionan como un referente en la fabricación de vehículos en la región.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La Figura 1, muestra el flujo de trabajo para el desarrollo y análisis de un modelo de control en la planta. Inicia con la obtención de datos técnicos y revisión bibliográfica, seguida por la formulación del tema. A partir de esta información, se crean dos modelos en Matlab: el modelo actual y un nuevo modelo PI, utilizando los datos adecuados para cada uno.

Luego, se realiza un análisis de los resultados esperados y una comparación entre el modelo actual y el nuevo modelo en relación con el proceso real de la planta. Finalmente, se extraen conclusiones basadas en esta comparación, lo que lleva a la propuesta de instalación de sensores ultrasónicos para optimizar el sistema.

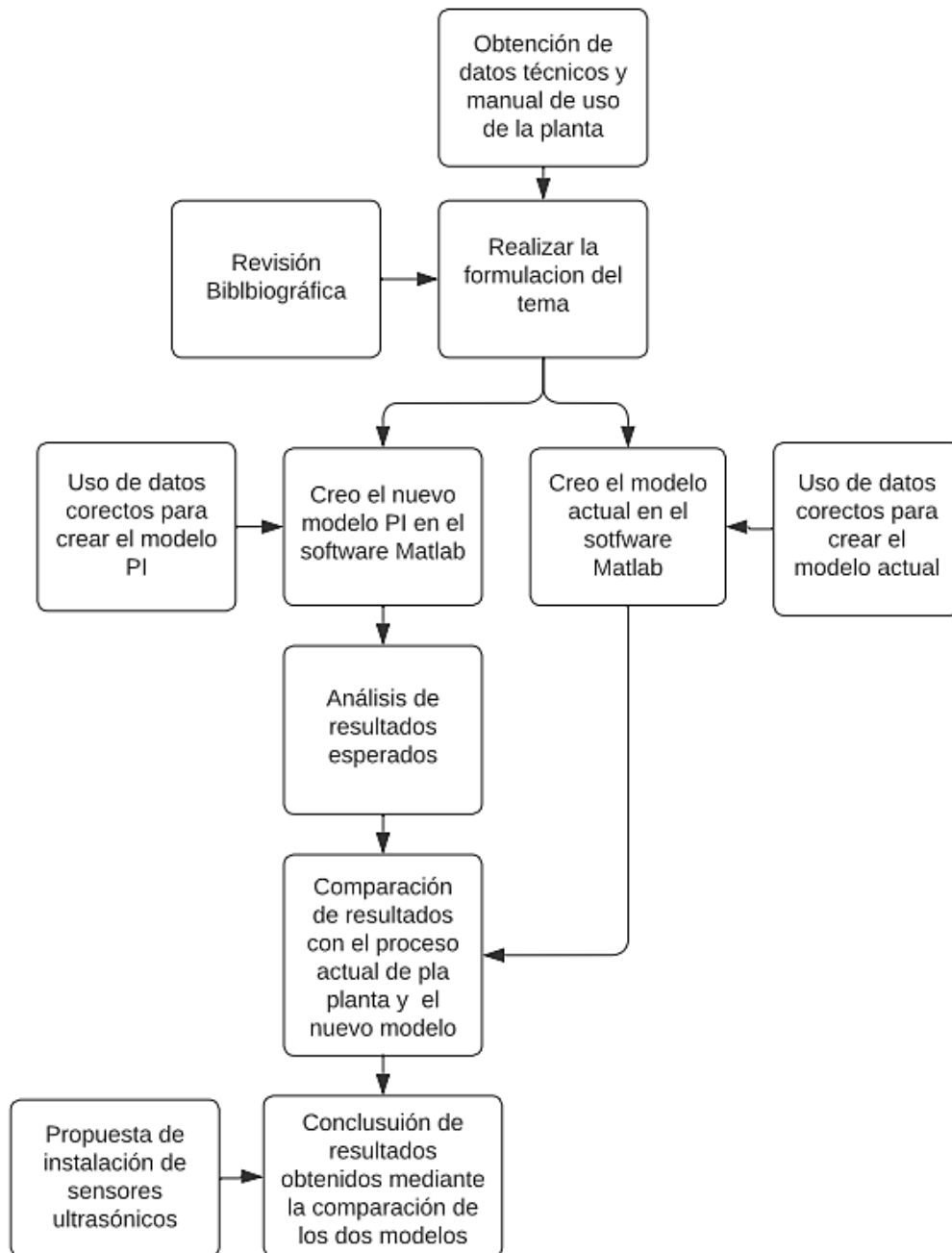


Figura 1. Metodología de la investigación.

3.3. SISTEMAS DE CONTROL

En la industria, es fundamental mantener un control preciso del nivel de líquidos dentro de los procesos de fabricación para garantizar una producción continua y evitar pérdidas o derrames. Para lograrlo, se implementan sistemas automáticos de llenado de agua u otros fluidos, los cuales son gestionados a través de sensores y actuadores conectados a un controlador lógico programable (PLC) o a un circuito de control eléctrico.

Estos sensores detectan el nivel del líquido dentro de un recipiente y envían señales al controlador, que a su vez activa o desactiva las bombas según sea necesario. Entre los

sensores más utilizados para este propósito se encuentran los de boya o flotadores, los cuales generan un pulso eléctrico al alcanzar un nivel determinado, permitiendo así una regulación eficiente del proceso y optimizando el uso de los recursos en la industria.

La responsabilidad de un sistema de control contempla las siguientes tres grandes tareas:

- Monitorear las variables de salida mediante mediciones.
- Tomar decisiones racionales observando que acción correctiva es necesaria sobre la base de la información del estado actual del proceso y el objetivo deseado.
- Implementar efectivamente estas decisiones sobre el proceso [4].

Las etapas que debemos tener en cuenta al momento de diseñar un sistema de control y poder satisfacer sus necesidades son: definir los objetivos de control, definir variables a medir, seleccionar variables manipuladas, seleccionar una posible configuración de control y diseñar un controlador [4].

3.3.1. Control en lazo abierto

Son los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En un sistema en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto como se observa en la Figura 2 sólo se utiliza si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas [5].



Figura 2. Diagrama Esquemático de un sistema de control de lazo abierto [5].

3.3.2. Control en lazo cerrado

El control en lazo cerrado se caracteriza porque existe una realimentación a través de los sensores desde el proceso hacia el sistema de control, que permite a este último conocer si las acciones ordenadas a los actuadores se han realizado correctamente sobre el proceso de (Ingeniería de Sistemas y Automática) [6].

En un sistema de control en lazo cerrado como se observa en la Figura 3, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas o integrales) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentando para reducir el error del sistema [6].

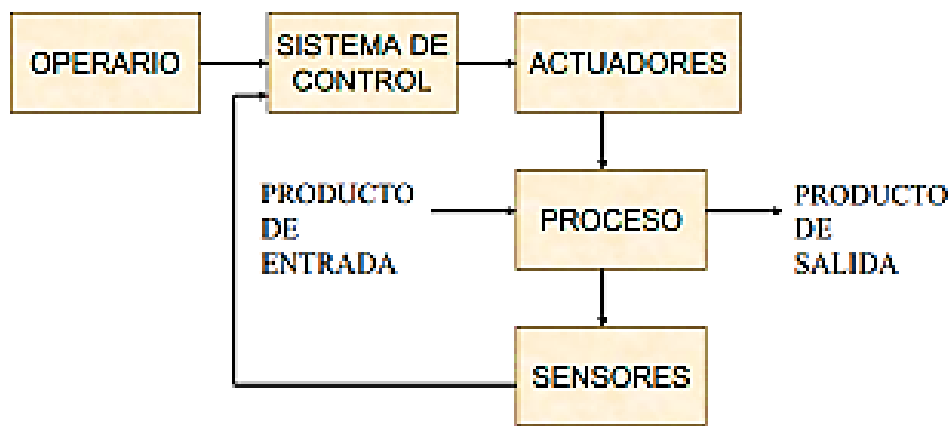


Figura 3. Diagrama Esquemático de un sistema de control de lazo cerrado [6].

El control de lazo cerrado es una estrategia ampliamente utilizada en sistemas industriales debido a sus ventajas en precisión, estabilidad y capacidad de respuesta ante perturbaciones, entre sus principales características se encuentran:

- En un sistema de lazo cerrado, la salida influye en la entrada, lo que permite una realimentación del proceso.
- Su diseño permite corregir los efectos de perturbaciones externas que puedan afectar el sistema.
- Debido a su mayor complejidad en comparación con un sistema de lazo abierto, su implementación resulta más costosa.
- Ofrece mayor precisión y exactitud en el control en comparación con un sistema de lazo abierto.

3.3.2.1. Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado

Los sistemas de control de lazo cerrado son clave en la automatización industrial, ya que ayudan a regular los procesos de manera más precisa y eficiente. A diferencia de los sistemas de lazo abierto, estos cuentan con un mecanismo de retroalimentación que compara la salida con un valor de referencia y ajusta la entrada automáticamente para corregir cualquier desviación. Para su funcionamiento, integran distintos componentes que se describe cada uno de ellos y se puede observar en la Figura 4 a continuación:

- Elemento de comparación: Este elemento compara el valor requerido o de referencia de la variable por controlar con el valor medido de lo que se obtiene a la salida, y produce una señal de error la cual indica la diferencia del valor obtenido a la salida y el valor requerido [5].
- Elemento de control: Este elemento decide que acción tomar cuando se recibe una señal de error [5].
- Elemento de corrección: Este elemento se utiliza para producir un cambio en el proceso al eliminar el error [5].
- Elemento de proceso: El proceso o planta, es el sistema dónde se va a controlar la variable [5].
- Elemento de medición: Este elemento produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada, y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar si hay o no error [5].

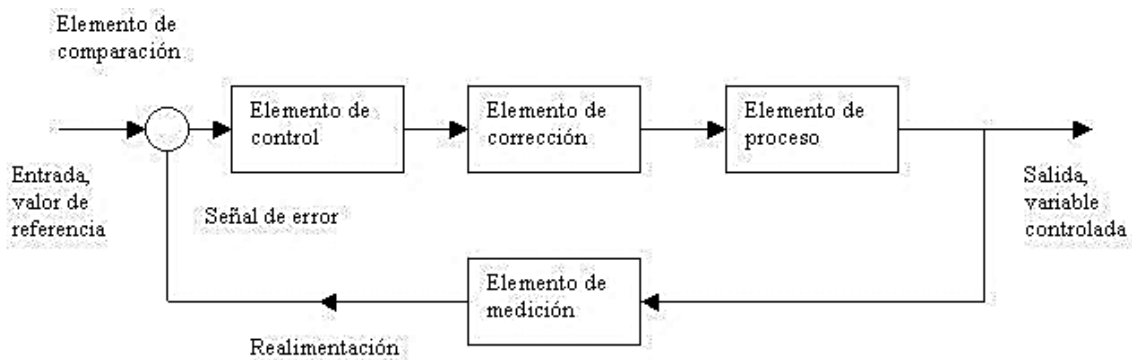


Figura 4. Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado [6].

3.3.2.2. Realimentación unitaria con lazo cerrado

Lo que hace falta en el sistema de control en lazo abierto para que sea más exacto y más adaptable es una conexión o realimentación desde la salida hacia la entrada del sistema. Para obtener un control más exacto la señal controlada y debe ser realimentada y

comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y salida a través del sistema para corregir un error. Un sistema con una o más trayectorias de realimentación como el que se acaba de escribir se denomina sistema en lazo cerrado [7].

En principio se asume el sistema de control representado en el diagrama de bloques de la Figura 5. Del mismo se desprende que la realimentación unitaria implementada compara directamente las señales Y con R y por tal razón se ha escrito E mientras que, el controlador C debe ser alimentado con una señal acondicionada de este error y por eso se escribe E_a .

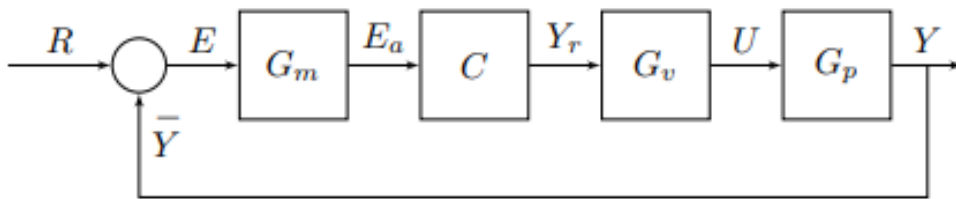


Figura 5. Esquema simplificado de una realimentación unitaria [7].

- Función de transferencia de lazo cerrado

Para el sistema que aparece en la Figura 6, la salida $C(s)$ y la entrada $R(s)$ se relacionan del modo siguiente obteniendo la ecuación (1).

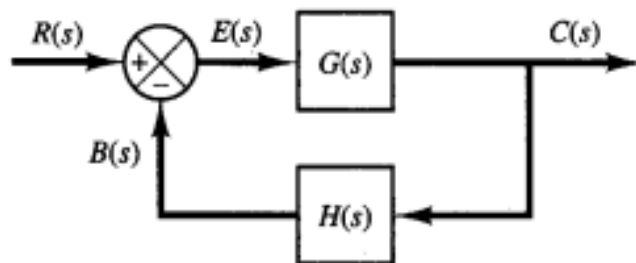


Figura 6. Sistema en lazo cerrado [7].

$$C(s) = G(s)E(s)$$

$$E(s) = R(s) - B(s)$$

$$= R(s) - H(s)C(s) \tag{1}$$

Si se elimina $E(s)$ de estas ecuaciones se obtiene (2):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} \tag{2}$$

La función de transferencia que relaciona $C(s)$ con $R(s)$ se denomina función de transferencia en lazo cerrado la ecuación (3) muestra la función de transferencia relaciona la dinámica del sistema en lazo cerrado con la dinámica de los elementos de las trayectorias directa y de realimentación.

A partir de la ecuación (3), $C(s)$ se obtiene mediante

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} R(s) \quad (3)$$

3.3.3. Control en lazo cerrado en comparación con control en lazo abierto

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado [8].

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración [8].

La estabilidad en un sistema de control en lazo abierto es más sencilla de diseñar, ya que no depende de la retroalimentación y, por lo tanto, la estabilidad no representa un desafío significativo. En cambio, en un sistema de control en lazo cerrado, la estabilidad se convierte en un factor crucial, ya que un ajuste inadecuado puede generar correcciones excesivas, lo que podría provocar oscilaciones constantes o de amplitud variable en el sistema y sería desfavorable.

3.3.4. Medición de nivel de agua

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido [9].



Figura 7. Tanque con sistemas de medición [10].

Los métodos más usados en industrias y procesos de llenados de tanques o depósitos de agua pueden ser causados en métodos de medición directa e indirecta como se observa en la Figura 7.

Los métodos de medición directa son por:

- Sonda
- Cinta
- Cristal
- Flotador (movimiento o fuerza)

3.3.4.1. Medición de nivel por sonda o varilla

Es una herramienta que debe estar graduada y debe ser de una longitud adecuada para no tener inconvenientes al momento de ingresarla al tanque o depósito del líquido, tener en cuenta que el reservorio debe estar a presión atmosférica y la medida ser tomada en la sección donde se encuentre mojada la varilla o regla [9].

3.3.4.2. Medición de nivel por cinta

Este proceso es usado en situaciones donde la distancia a medir es más profunda y la varilla o regla graduada es casi imposible usar, por lo que se realiza la medición con una cinta graduada y un plomo. El plomo hará que la cinta llegue a la superficie inferior de un pozo o recipiente de gran magnitud y la medida será tomada hasta donde la cinta al momento de sacarla esta mojada [9].

3.3.4.3. Medición de nivel por cristal

Este método la mayoría de las veces se lo aplica fuera del tanque, esto es posible debido a que se le hace una salida al tanque para que al momento de ir llenando mediante el visor de vidrio o un tubo acrílico se logre ver la cantidad de líquido que sube el nivel, complementado esto con tres válvulas de cierre por seguridad [9].

3.3.4.4. Medición de nivel por flotador

El flotador basado en el principio de Arquímedes, está hecho de tal manera que, cuando el nivel baja, el caudal hacia el depósito aumenta y cuando el nivel sube, el caudal disminuye y si es necesario se corta [9].

La medición indirecta se puede realizar por medio de métodos como:

- Por presión hidrostática.
- Por características electricas del líquido.
- Medidor de nivel ultrasónico.
- Medidor de medición de nivel radioactivo.
- Medidor de nivel láser.

3.3.4.5. Medición de nivel por presión hidrostática

Este método se lo realiza con instrumentos ya creados como: manómetro, burbujeo, presión diferencial, estos se utilizan para tomar los datos de una manera más eficiente. Estos datos son conectados en puntos clave donde se logre tomar una muestra con un mayor rango de efectividad [10].

3.3.4.6. Medición de nivel por características electricas del líquido

El agua debe ser lo suficientemente conductor como para realizar el espacio entre el líquido y su vapor, además el líquido cuyo nivel se requiere medir actúa como dieléctrico [10].

Este método se lo realiza con instrumentos ya creados para tomar los datos de una manera más eficientes de estos existen dos tipos que son:

- Medidor de nivel resistivo
- Medidor de nivel capacitivo

3.3.4.7. Medidor de nivel ultrasónico

Un sensor de nivel ultrasónico es un sensor que utiliza el principio ultrasónico para medir la altura de una superficie líquida o sólida. Realiza la medición del nivel de líquido mediante la transmisión de pulsos ultrasónicos y la medición del tiempo de retorno del pulso para determinar la distancia entre la superficie del líquido y el sensor [11].



Figura 8. Sensor de nivel de líquido ultrasónico [11]

3.3.5. Control ON- OFF

Este tipo de controlador, también llamado Todo o Nada, usa un algoritmo simple para solamente revisar si la variable de proceso está por encima o por debajo de un (SETPOINT) determinado. En términos prácticos, la variable manipulada o la señal de control del controlador cambia entre “totalmente ON” o totalmente OFF, sin estados intermedios. Este tipo de accionamiento provoca un control muy impreciso de la variable de proceso. Otra definición de los controladores ON/OFF, también llamados controladores binarios, se utilizan para sistemas de control lento. Aquí, el valor real cambia lentamente [12].

A veces, el elemento de control tiene sólo dos posiciones, o bien está totalmente cerrado o totalmente abierto. Este elemento de control no funciona en ninguna posición intermedia, es decir, en posición parcialmente abierta o parcialmente cerrada. El sistema de control hecho para controlar tales elementos se conoce como la teoría de control apagado. En este

sistema de control, cuando la variable de proceso cambia y cruza cierto nivel preestablecido, el valor de salida del sistema se abre repentinamente completamente y da una salida del 100 % y cuando la variable de proceso cruza un nivel predeterminado, el valor de salida se cierra inmediatamente, reduciendo la salida al 0% [13].

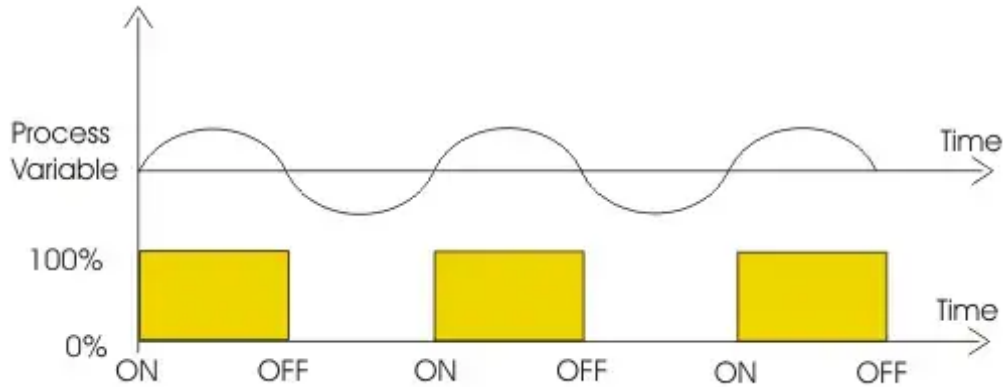


Figura 9. Teoría del control ON-OFF [13].

3.3.5.1. Ventajas del control ON/OFF

- Este tipo de controlador es económico, ya que no requiere algoritmos complejos ni equipos sofisticados.
- Su respuesta es inmediata al activarse o desactivarse al alcanzar el nivel preestablecido en los tanques, lo que facilita su uso en procesos sencillos.
- Su bajo costo de mantenimiento, debido a que su diseño simple reduce la probabilidad de fallas.
- Esta simplicidad ha permitido que la planta gestione manualmente el nivel de los tanques sin requerir personal especializado en automatización.

3.3.5.2. Desventajas del control ON/OFF

- El no poder regular de forma continua el flujo, se producen oscilaciones constantes en el nivel de los tanques, lo que provoca ineficiencias en el proceso de abastecimiento de agua clarificada, blanda y desmineralizada.
- La falta de precisión también aumenta el riesgo de derrames o desabastecimientos, afectando directamente a la producción de la planta
- El desgaste mecánico de las bombas y válvulas debido a los frecuentes encendidos y apagados, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la vida útil de los equipos.

- Y Este sistema no es adecuado para responder a cambios repentinos en la demanda de agua, ya que no es capaz de ajustar el flujo de manera gradual.

3.3.5.3. Válvulas ON/OFF

Las válvulas ON-OFF o también conocidas como válvulas de todo o nada, son un tipo de válvulas que solo tienen dos estados: completamente abiertas o completamente cerradas. Estas válvulas son ampliamente utilizadas en aplicaciones donde el flujo completo o la interrupción completa del flujo son necesarios [14].

- Estas válvulas traen varios beneficios que hacen de ellas un uso recurrente hasta la actualidad y son:
- Una de las principales ventajas de las válvulas ON/OFF es su simplicidad.
- Las válvulas ON/OFF suelen ser más económicas en comparación con las válvulas de regulación.
- Si se requiere un control preciso del flujo, una válvula de regulación es la opción más adecuada
- Fiabilidad
- Cierre hermético

3.3.6. Control PID

El control PID es un mecanismo de control que, a través de un lazo de retroalimentación, permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada (Set-Point). En sistemas de bombeo, regularmente nos interesa mantener la presión o flujo constante, por lo tanto, el control PID mide la diferencia entre la presión en la tubería y la presión requerida y actúa variando la velocidad del motor para que podamos tener nuestra presión o flujo constante [15].

La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. En el campo de los sistemas para control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, aunque tal vez en muchas situaciones específicas no aporten un control óptimo [16].

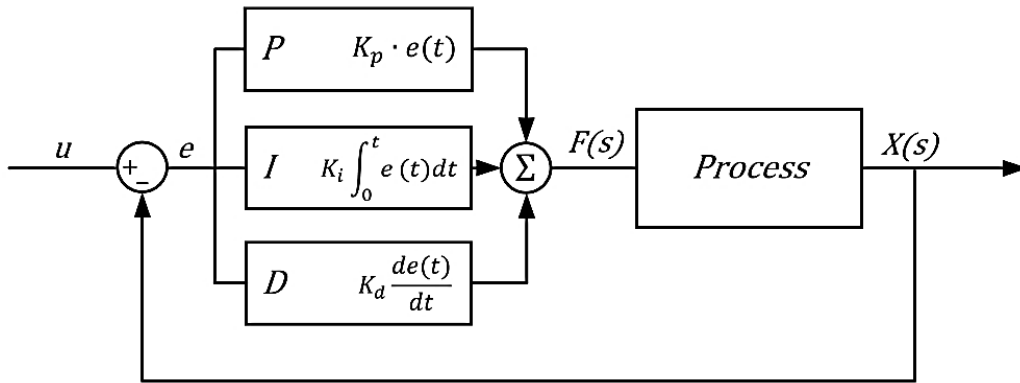


Figura 10. Diagrama de bloques de un control PID [16].

3.3.6.1. Características del control PID

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es una de las técnicas más utilizadas en sistemas de control debido a su simplicidad y eficacia sus características principales son:

Componentes del Control PID

- Control Proporcional (P):
 - Responde proporcionalmente al error (diferencia entre el valor deseado y el valor real).
 - Mejora la velocidad de respuesta y reduce el error inicial.
 - Puede introducir un error estacionario si se utiliza solo.
 - Ganancia proporcional K_p ajusta la intensidad de la acción proporcional.
- Control Integral (I):
 - Acumula el error en el tiempo y lo corrige.
 - Reduce el error estacionario a cero.
 - Puede causar oscilaciones si no se ajusta adecuadamente.
 - Ganancia integral K_i ajusta la acción correctiva integral.
- Control Derivativo (D):
 - Acumula el error en el tiempo y lo corrige.
 - Responde al cambio en la tasa del error.
 - Mejora la estabilidad y disminuye las oscilaciones.
 - Ayuda a anticipar cambios y ajustar el control antes de que el error sea grande.
 - Ganancia derivativa K_d ajusta la acción correctiva derivativa.

3.3.6.2. Principio de funcionamiento del control PID

El controlador más popular en la industria es el controlador PID. Este resulta de la combinación lineal de tres modos, el modo proporcional (P), el modo integral (I) y el modo derivativo (D).

- El modo proporcional multiplica la señal de error actual por un factor constante llamado ganancia del modo proporcional (K_r). El efecto corrector del modo proporcional resulta (4):

$$P = k_r e(t) \quad (4)$$

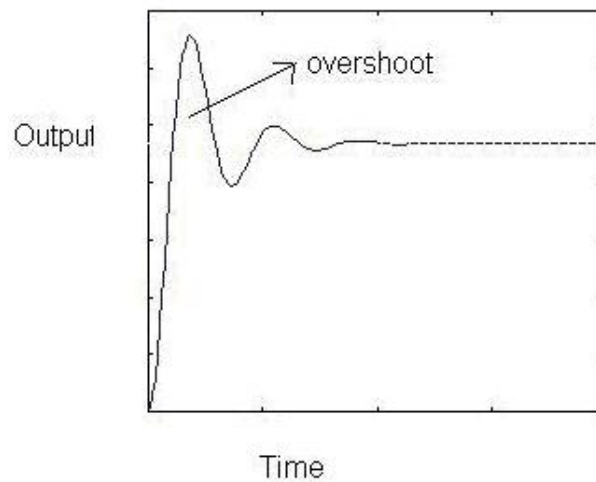


Figura 11. Salida del proceso de control proporcional [17].

- El modo integral, como su nombre lo indica, integra el error actual y dicha integral es afectada por una constante $\frac{K_r}{T_i}$ donde T_i es conocida como el tiempo de acción integral. Así, el efecto corrector del modo integral resulta (5):

$$I = \frac{K_r}{T_i} \int_0^t e(t) dt. \quad (5)$$

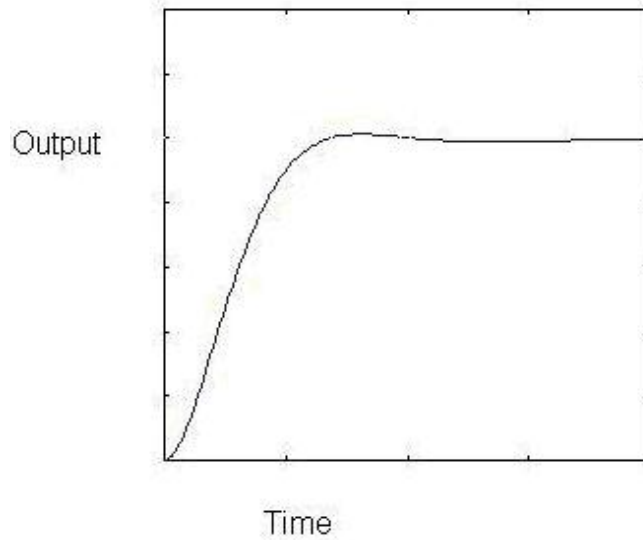


Figura 12. Salida del proceso de control integral al control proporcional [17].

- El modo derivativo deriva la señal de error actual multiplicando dicho resultado por una constante $K_r T_D$ donde T_D es conocida como tiempo de acción derivativo. Así, el efecto del modo derivativo resulta (6):

$$D = K_r T_D \frac{det}{dt} \quad (6)$$

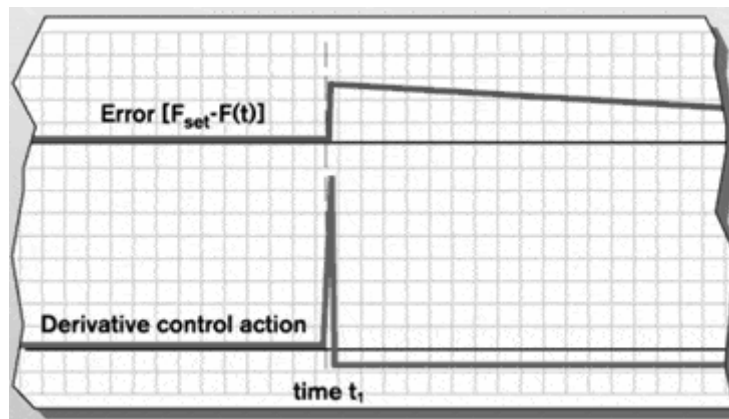


Figura 13. Salida del proceso de control derivativo [17].

3.3.6.3. Ventajas del control PID

- Con una adecuada sintonización, el PID optimiza la respuesta del sistema, reduciendo tiempos de estabilización y oscilaciones.
- Facilita la automatización completa del sistema de bombeo y permite el monitoreo en tiempo real, eliminando la dependencia de la intervención manual.

- Su capacidad para corregir errores actuales, pasados y futuros mediante la combinación de acciones proporcional, integral y derivativa garantiza una respuesta eficiente ante cambios en la demanda.

3.3.6.4. Desventajas del control PID

- El desempeño del PID se ve afectado si los sensores de nivel no funcionan correctamente o presentan retardos.
- Antes de su implementación, es necesario realizar múltiples simulaciones y ajustes para garantizar su eficiencia, lo que demanda tiempo y recursos.
- Ajustar los parámetros (proporcional, integral y derivativo) para lograr un desempeño óptimo puede ser complicado, especialmente en sistemas no lineales como el bombeo de agua.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DECLARACIÓN DE VARIABLES

- **Variable Dependiente**

Control de nivel de agua ON-OFF

- **Variable Independiente**

Controlador PI

4.2. ESTADO ACTUAL DE LA PLANTA

La fábrica de autos CIAUTO cuenta con procesos los cuales son de soldadura, pintura, vestidura final y pista de pruebas dinámica, a lo largo de los años se ha innovado con nuevas tecnologías para agilizar y facilitar sus procesos de producción. Dentro de esta actualización buscan la automatización de sus procesos en el sistema de la planta de tratamiento de agua que se utiliza tanto para la pintura de las piezas de los automóviles como para procesos de limpieza en corrección de errores finales.

La planta de tratamiento de agua está dividida en 4 procesos desde su captación de agua de la cisterna o captación de agua de lluvia por medio de piscinas, hasta todos los usos que requiere la fábrica para cumplir con sus trabajos industriales para la fabricación de autos.



Figura 14. Estado actual de la planta de agua en la fábrica CIAUTO.

4.2.1. Proceso del tratado de agua

En la Figura 15, se representa el diagrama de flujos de la planta de tratamiento de agua, mostrando el proceso completo que se realiza. Este diagrama nos ayudara a simular el sistema interactivo para la formulación de ecuaciones que se usaran en el control ON-OFF con histéresis y control PI. Desde su captación hasta su almacenamiento para distintos usos. Inicialmente, el agua es recolectada de fuentes como piscinas y acequias e ingresa al sistema a través de una electroválvula, depositándose en el Tanque 1 de agua clarificada. Luego, mediante una bomba, el agua pasa por un sistema de filtrado y ablandamiento antes de almacenarse en el Tanque 2 de agua blanda, desde donde se bombea para el Proceso 1 de llenado de piscinas.

Paralelamente, el agua también es enviada al Tanque 3 de agua blanda, donde una bomba impulsa el líquido hacia el Proceso de ósmosis, generando agua desmineralizada que se distribuye en los tanques T4, T5, T6 y T7. Posteriormente, una bomba impulsa el agua desmineralizada a través de un sistema de lámparas UV para su purificación final, antes de ser utilizada en el Proceso 2 de almacenamiento para varios usos.

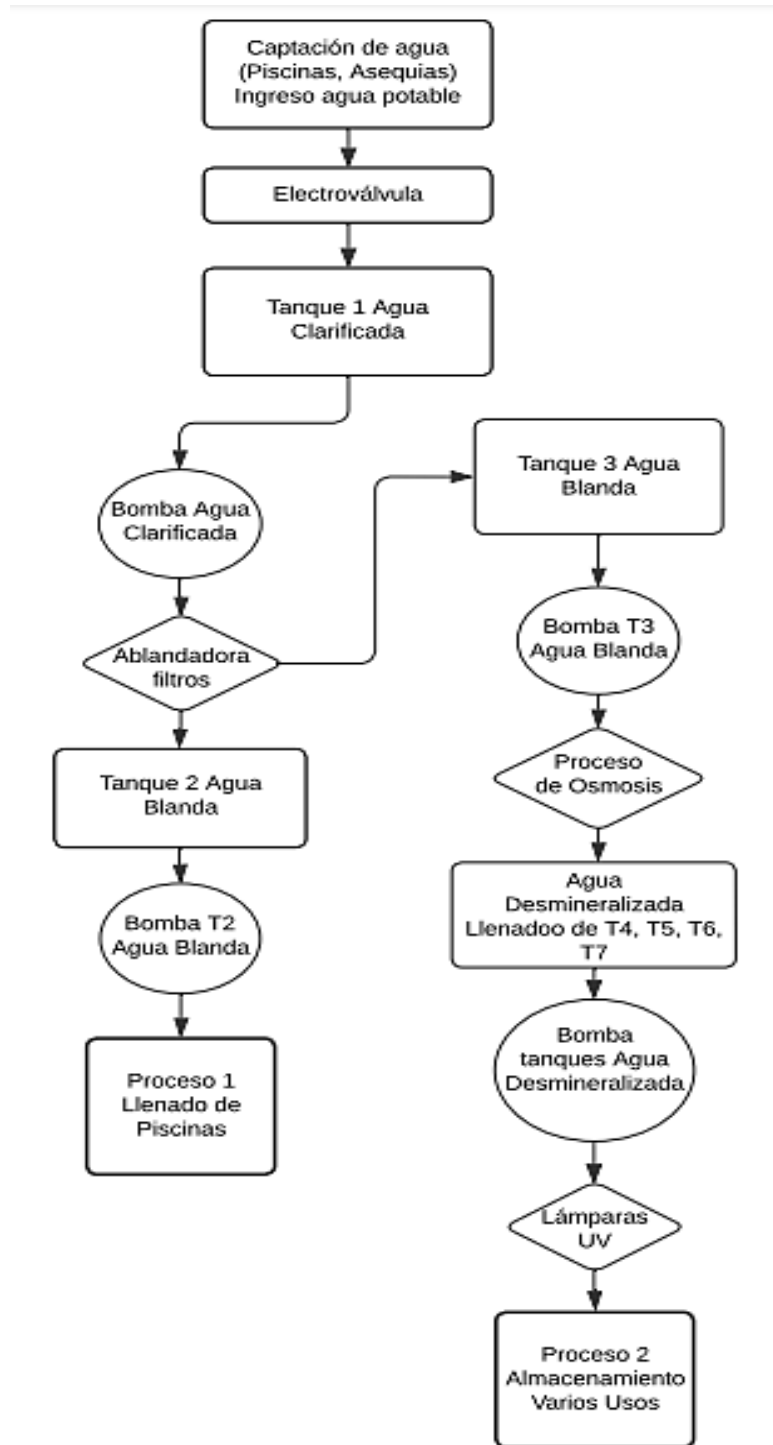


Figura 15. Diagrama de flujos del proceso de tratado de agua.

4.2.2. Sistema de llenado actual de tanques

Actualmente la empresa CIAUTO maneja un sistema no tan moderno a la automatización de sus procesos, un problema es la activación de las bombas y la revisión del nivel de llenado de cada tanque que usa un sistema de medición del nivel por flotadores o boyas que se encuentran ubicadas en la parte superior de la altura del tanque mostradas en la estas

mismas se accionan con niveles mínimos y máximos de activación que se muestra en la Figura 16.

- Nivel máximo activación: 30cm desde la parte superior hacia abajo
- Nivel mínimo activación: 30cm desde la base del tanque

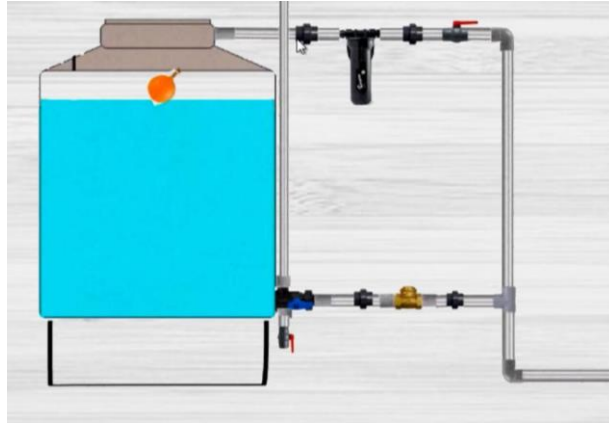


Figura 16. Estado actual del control de nivel de llenado de cada tanque.

En la Figura 17, se representa el sistema de llenado actualmente en funcionamiento, simulando el proceso real de la planta. Por otro lado, la Figura 17 mostrará uno de los siete tanques que conforman el sistema de tratamiento de agua en la fábrica CIAUTO.



Figura 17. Tanque instalado actualmente en CIAUTO.

Por otro lado, en la Figura 18 se muestran los datos de medida en un tanque que generalmente es para los 7 tanques que se encuentran instalados en la planta de tratamiento de agua.

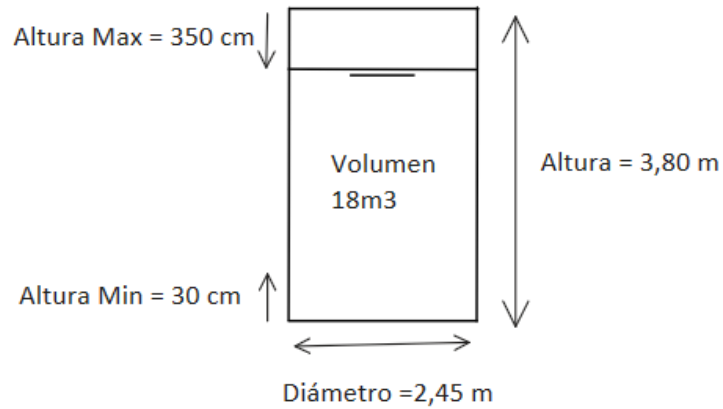


Figura 18. Medidas generales de un tanque de agua.

Mientras tanto en la Figura 19, se observan las 4 bombas hidráulicas que realizan el proceso en la planta de tratamiento de agua en la fábrica de autos CIAUTO.



Figura 19. Bombas hidráulicas para la planta de tratamiento de agua.

La Tabla 1 presenta información técnica relevante sobre las cuatro bombas del sistema, incluyendo su caudal, altura de empuje, tipo de conexión, voltaje, corriente, potencia en

HP y especificaciones de la tubería. Sin embargo, se observa que algunos datos no están registrados, lo que indica que no fue posible recolectar toda la información necesaria.

Tabla 1. Características de las bombas hidráulicas.

DATO	TABLA DE CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS.			
	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	BOMBA 4
Caudal	24	24		24
Altura de empuje	40	40		44
Conexión	D/Y	D/Y	D/Y	
Voltaje	220-380-460 V	208-380 V	208-380 V	208-380 V
Corriente	22 A	7.97 A	8.2 A	
HP	7.5	7.2	7.2	
Tubería	1 1/2 in	1 1/2 in	1 1/2 in	1 1/2 in



Figura 20. Lámpara UV VIQUA- S950RL 2

En la Figura 20 se muestra un sistema de lámparas UV modelo VIQUA S950RL 2, utilizado para la desinfección de agua. Se observan dos cilindros metálicos verticales con

cables de alimentación y tuberías de PVC conectadas, lo que indica su función dentro de un sistema de tratamiento de agua para su llegada a planta en la empresa CIAUTO.



Figura 21. Sistema de Ósmosis.

El sistema de ósmosis mostrado en la Figura 21, es un equipo diseñado para la purificación de agua mediante la eliminación de sales, impurezas y microorganismos a través de membranas semipermeables. La estructura metálica con ruedas facilita su movilidad, mientras que sus componentes principales incluyen una carcasa de acero inoxidable para filtración, una bomba de alta presión que impulsa el agua, un conjunto de membranas dispuestas horizontalmente y un panel de control digital para monitorear el proceso. Además, cuenta con tuberías y válvulas que regulan el flujo del agua, garantizando un tratamiento eficiente utilizado en aplicaciones industriales, alimentarias y de desalinización.

- Los puntos de instrucción de cada proceso y tanque se los redactará a continuación.

Los tanques completan entre 4 y 6 ciclos de proceso por semana, sin considerar el volumen total de agua utilizada. Una ventaja para la fábrica es su sistema de recolección de agua de lluvia, lo que permite un ahorro significativo en el consumo de agua potable cada mes.

Se debe tomar en cuenta puntos importantes del proceso que se trata en la planta de agua.

- En cada proceso no se realiza la misma sucesión, pero por completo se cuenta los procesos de agua blanda y desmineralizada total a la semana.

- Este número de procesos dependen mucho del nivel de producción que tenga la empresa.
- Para llenar dos tanques de agua blanda se necesitan al menos 3 tanques de agua clarificada, los cuales que pasa por un proceso de ablandamiento a través de filtros.
- Uno de los dos tanques de agua blanda, tiene un proceso individual que va directo a planta.
- El segundo tanque de agua blanda pasa por un proceso de limpieza a través de lámparas donde realiza la limpieza de minerales del agua y dejando agua con más pureza para transformarla en agua desmineralizada.
- El segundo tanque de agua blanda es el encargado de llenar 4 tanques de agua desmineralizada pasando por el proceso de osmosis para legar a cumplir con el proceso final, este tanque debe de satisfacer la demanda del agua desmineralizada requerido en la empresa.

El proceso actual que tiene la planta es el que se requiere automatizar mejorando su sistema de control en la planta con la implementación de equipos industriales más actuales que agiliten el desempeño del personal técnico. Dentro de ello tienen por objetivo la automatización del bombeo de cada proceso y el incorporar sensores más inteligentes que permitan ver el nivel de agua a tiempo real en cada tanque.



Figura 22. Funcionamiento de la electroválvula para el agua clarificada.

Uso de las electroválvulas en el sistema solo es usado al ingreso del agua que se obtiene a través del reservorio, tanto potable como agua de recolección de la lluvia, este equipo solo actúa como llave de paso que llena el tanque de agua clarificada como se observa en la Figura 22.

Sin embargo, la salida de cada bomba que actúan como succionadores de agua para seguir con cada proceso, la válvula que esta delante de la bomba es usada solo por protección de la bomba y tiene una la activación en forma secuencia a la bomba, que cuando la bomba se prende la válvula se abre 100% y cuando la bomba se apaga la válvula se cierra al 0%. Sin embargo, dentro del sistema propuesto las válvulas ya están incorporadas al caudal de la bomba y este mismo dato es primordial para realizar el modelamiento de las ecuaciones.

4.3. MODELADO MATEMÁTICO DE UN TANQUE.

Los sistemas de tanques se componen de muchos elementos y subsistemas. Dos de esos subsistemas son el sistema de llenado y el sistema de nivel, los cuales se desarrollan en este artículo. Dichos sistemas son fundamentales para la correcta automatización y control de un sistema de tanques [18].

Si se considera inicialmente un estanque con una entrada continua y una salida continua, se obtiene una tasa de cambio de volumen dentro del tanque, que está en función de la diferencia de los caudales de entrada (q_1) y salida (q_0), donde la diferencia de nivel de agua del tanque y esto se demuestra en la ecuación (7).

$$\frac{dv}{dt} = q_1 - q_0 \quad (7)$$

Este modelo inicial demuestra el comportamiento de llenado y vaciado de un tanque de agua, a partir de esta ecuación que se toma como punto de partida para desarrollar el sistema completo de la planta de agua en la empresa CIAUTO.

El sistema de tanques seleccionados para el estudio en esta investigación es un sistema de tanques cilíndricos que están acoplados y tienen de dos niveles. Se seleccionó este tipo de sistema de tanques ya que este es ampliamente usado en plantas de tratamiento de agua, así como en otros sectores de la industria como en la industria de bebidas y en procesos químicos. Un sistema de tanques acoplados también se le conoce como sistema interactivo. Esto se debe a que hay interrelación entre las variables, es decir, el nivel del primer tanque

afecta al del segundo; y el nivel de éste afecta a los otros que estén interconectados o acoplados por medio de tubería a este [18].

Tabla 2. Variables

$h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$	Altura de líquido de cada tanque
$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$	Área de cada tanque
R_1, R_2, R_3, R_4	Bombas
q_i, q_m, q_0, q_1, q_2	Resistencia del fluido causado por las válvulas

La Tabla 2, presenta las variables clave del sistema de tratamiento de agua, incluyendo capacidades de fluido, áreas de los tanques, bombas y resistencias del flujo. La Figura 23, muestra el esquema del sistema, donde se observa el recorrido del agua desde su ingreso hasta para su distribución en diferentes procesos, destacando la interacción entre tanques, válvulas y bombas.

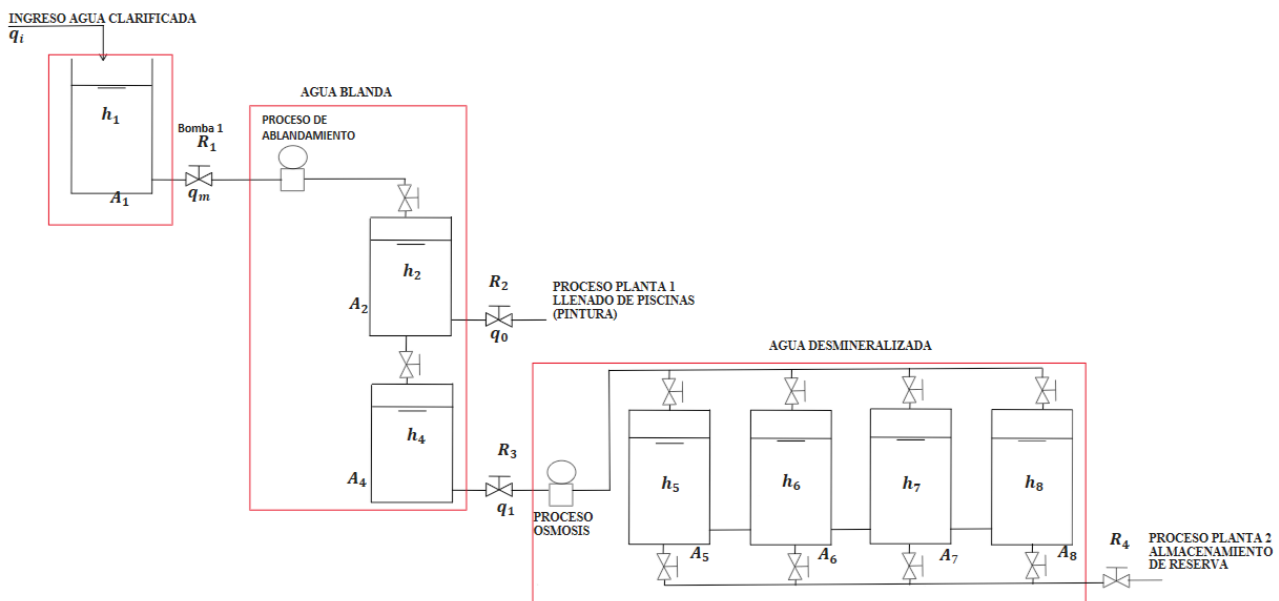


Figura 23. Sistema completo de la planta de tratamiento de agua (sistema interactivo).

Este sistema consta de varias etapas para el manejo y tratamiento de agua clarificada, transformándola en agua blanda y agua desmineralizada para procesos industriales. El agua ingresa al tanque inicial (h_1) por el caudal (q_i), donde se almacena antes de pasar por el sistema ablandamiento empujado de una bomba (R_1), y va hacia el tanque de agua blanda

(h_2). Posteriormente, el agua fluye hacia un tanque de reserva (h_{p1}) empujado por una bomba (R_2), completando la primera fase del tratamiento.

Desde aquí, el tanque (h_3) de agua blanda realiza un proceso de filtración de agua aún más eficiente pasando por un proceso de osmosis, para después ser empujado a través de una bomba (R_3), esta misma regula el flujo (q_1) y se dirige hacia el llenado de los cuatro tanques (h_4, h_5, h_6, h_7).

En la última fase, el agua desmineralizada que se almacena en los cuatro últimos tanques se transfiere al tanque de almacenamiento final (h_{p2}) llamado piscina de agua desmineralizada que usan para la parte de pintura de las piezas del automóvil u otros sistemas industriales, esta agua es empujada a través de una bomba (R_4) regulando el flujo (q_2).

El sistema está diseñado para garantizar un flujo continuo y controlado mediante las bombas hidráulicas (R_1, R_2, R_3, R_4) y para mantener niveles adecuados en cada tanque. Su diseño permite almacenar, tratar y distribuir agua según las necesidades, asegurando eficiencia en procesos como la pintura industrial y el mantenimiento de reservas críticas.

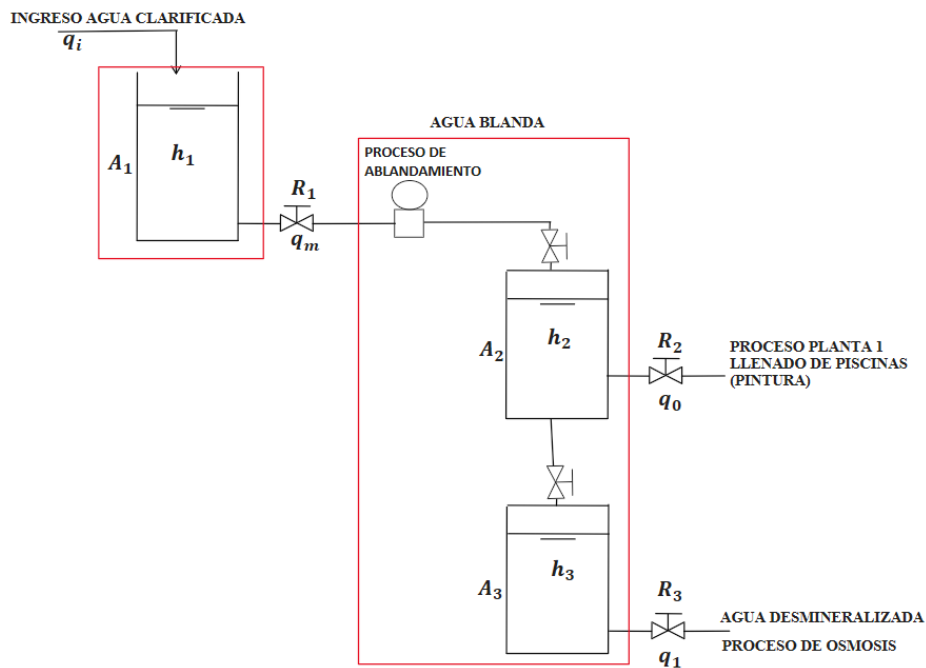


Figura 24. Sistema agua blanda (sistema interactivo).

A continuación, en la Figura 24 e presenta el diagrama de flujo en el que se distinguen los componentes y los parámetros necesarios para el modelado matemático, mostrando la ecuaciones (11), (12) y (13) de los 3 tanques del sistema de agua blanda partiendo del

funcionamiento demostrado para la Figura 23, para que se realice la simulación en MATLAB. Dichos elementos permiten formular las ecuaciones que más tarde se implementarán en SIMULINK. Para obtener el modelo matemático mediante la lógica de bloques, se aplica la teoría de balance de masa a cada uno de los tanques.

El proceso de llenado de los tanques de agua blanda trabaja con la condición del llenado de agua cruda, es decir que el tanque de agua cruda debe trabajar a tope para que pueda satisfacer el proceso de ablandamiento y llenar dos tanques de su mismo volumen. Para que posteriormente la planta demande lo que se necesitaría utilizar para completar sus procesos.

- Para realizar el proceso de desmineralización a 4 tanques el agua cruda deberá trabajar 5 veces más para poder llenar 1 tanque de la misma a la vez.
- El Tanque 3 de agua blanda deberá trabajar 4 veces más para poder realizar el proceso de osmosis con vista a llenar los tanques de agua desmineralizada.
- Los tanques de agua desmineralizada se vacían uno a uno dependiendo de la demanda del proceso que requiera la planta.

4.4.MEDIDOR ULTRASÓNICO

Mediante una búsqueda completa se ha determinado la propuesta de la instalación del sensor ultrasónico de la marca SITRANS LU150, ya que tienen una muy buena característica de su tamaño y fácil instalación en cada tanque, este equipo tiene una ventaja de ser por vía bluetooth y puede ser monitoreado desde un dispositivo celular o tablet.

Esto traerá beneficios principalmente a operarios de la fábrica de autos CIAUTO ya que podrán monitorear a que nivel de agua se encuentra cada tanque desde un punto cercano.



Figura 25. Medición de nivel en líquidos SITRANS LU150.

4.4.1. Características

- No requiere interacción directa con el medio, lo que reduce el desgaste del sensor y permite mediciones en condiciones difíciles, como medios corrosivos o abrasivos.
- La precisión no depende de factores como densidad, viscosidad o color del medio, lo que lo hace versátil para diferentes aplicaciones.
- Permite ajustes iniciales incluso cuando el depósito está vacío, facilitando la instalación y la calibración.
- Adecuado para depósitos de gran altura y ambientes hostiles gracias a la estabilidad y robustez del sensor ultrasónico.
- Usado en líquidos, sólidos y otros medios, lo que lo convierte en una solución eficaz para industrias como la alimentaria, química y de tratamiento de agua.

4.4.2. Ventajas

- El diseño compacto del sensor facilita su instalación, incluso en espacios reducidos o entornos con acceso limitado.
- Las mediciones no se ven afectadas por la densidad, viscosidad, color u otras características físicas del medio, lo que garantiza resultados precisos en diversas aplicaciones.
- El sensor puede configurarse y calibrarse sin necesidad de que el depósito contenga medio, lo que ahorra tiempo y esfuerzo durante la instalación.
- La tecnología ultrasónica permite medir sin contacto directo con el medio, eliminando problemas asociados con desgaste mecánico y garantizando un funcionamiento confiable a largo plazo.
- Al no tener piezas móviles ni contacto con el medio, el sensor opera sin necesidad de mantenimiento regular, lo que reduce costos operativos y aumenta la eficiencia.
- Ideal para aplicaciones en depósitos con medios agresivos, corrosivos o abrasivos, gracias a su diseño resistente y método de medición robusto.

4.4.3. Desventajas

- Factores como cambios de temperatura, presión, humedad o la presencia de corrientes de aire pueden afectar la precisión de las mediciones.
- Superficies inclinadas o muy absorbentes pueden dificultar el retorno del eco ultrasónico, disminuyendo la efectividad del sensor.

- En líquidos con espuma, burbujas o movimientos intensos, el sensor puede tener dificultades para reflejar la señal correctamente, afectando los resultados.
- Aunque el SITRANS LU150 es efectivo para distancias cortas y medianas, puede no ser adecuado para depósitos extremadamente altos o aplicaciones con rangos de medición mayores.
- Fuentes de ruido ultrasónico en el entorno pueden interferir con la señal emitida, reduciendo la fiabilidad de las mediciones.
- Para un funcionamiento óptimo, es esencial que el sensor esté alineado correctamente y libre de obstáculos, lo que puede complicar la instalación en algunos casos.
- Aunque el sensor no entra en contacto con el medio, no es ideal para medir líquidos extremadamente viscosos debido a su capacidad limitada para generar ecos claros en tales casos.

4.4.4. Magnitud de entrada

El plano de referencia para la medición es el lado inferior del transductor. Todas las informaciones acerca del rango de medición, así como el análisis de señal interno se refieren a esto. Para todos los instrumentos hay que mantener una distancia mínima del lado inferior del transductor la llamada zona muerta, donde no es posible ninguna medida todo esto se observa en la Figura 26.

1. Plano de referencia.
2. Rango de medición máx. en líquidos: 5 m (16.4 ft)
3. Distancia de bloqueo.
4. Rango de medida útil.

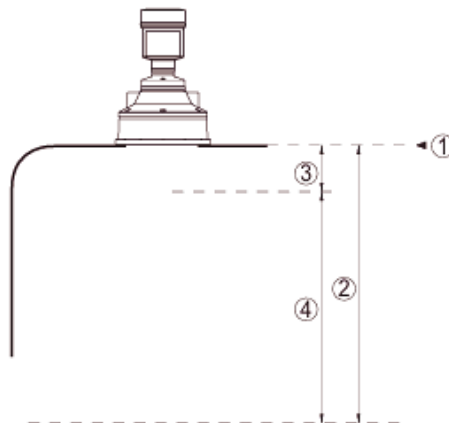


Figura 26. Datos de la variable de entrada para SITRANS LU150[19].

- **Montaje en tanque de agua**

A causa de los contenidos de sólidos y la variación de densidad del contenido del tanque es adecuado la medición de nivel sin contacto con ultrasonido. El transductor encapsulado en PVDF del SITRANS LU150 es resistente contra los gases agresivos en el tanque y solo requiere y tubuladura roscada G1½ A-como conexión a proceso [19].

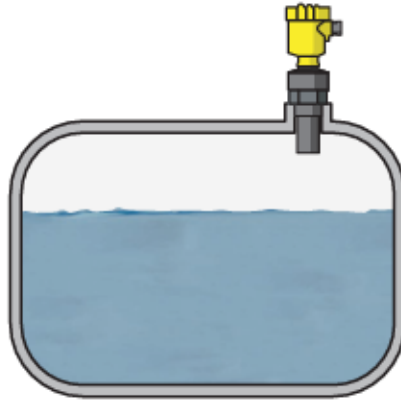


Figura 27. Medición de nivel en el tanque de aguas residuales con SITRANS LU150[19].

- **Ajuste en el entorno del punto de medición - inalámbrico por Bluetooth**

El módulo de visualización y configuración con la tecnología Bluetooth integrada permite la conexión inalámbrica con smartphones/tabletas con sistema operativo iOS o Android. El ajuste se realiza a través de la aplicación desde el Apple App Store o Google Play Store [19].



Figura 28. Conexión inalámbrica con smartphones/tabletas [19].

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Modelo matemático del sistema de llenado

El diagrama mostrado en la Figura 24, partiendo de principios generales del funcionamiento de la planta de tratamiento de agua en la fábrica CIAUTO, el modelo a simular será el de la Figura 23, a continuación, se detallarán las ecuaciones de cada uno de los tanques y su interpretación en cada figura correspondiente simulado en Simulink.

- Volumen

$$q = \frac{h_i - h_j}{R} \quad (8)$$

- El cambio de altura en un tanque.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\text{Flujo neto}}{A} \quad (9)$$

- El tiempo característico, este permite simplificar la ecuación, eliminando A y R.

$$t = AR \quad (10)$$

Se describe la entrada y salida de nivel de agua por tanque a continuación:

Primera ecuación: tanque 1 (h_1).

- Flujo de entrada: (q_i) que es el flujo de agua que llega al tanque desde una fuente externa.
- Flujo de salida hacia el tanque 2.
- Balance de masa.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A_1} (q_i - q_m)$$

- Sustituyendo (q_m) y dividiendo todo para $A_1 R_1 = t_1$ nos queda la ecuación (11), que se representa en la Figura 29.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{t_1} (R_1 q_i - h_1 + h_2) \quad (11)$$

Aplicando LAPLACE para la primera ecuación nos queda que:

$$H_1(s) = \frac{R_1 Q_i(s) + H_2(s)}{t_1 s + 1}$$

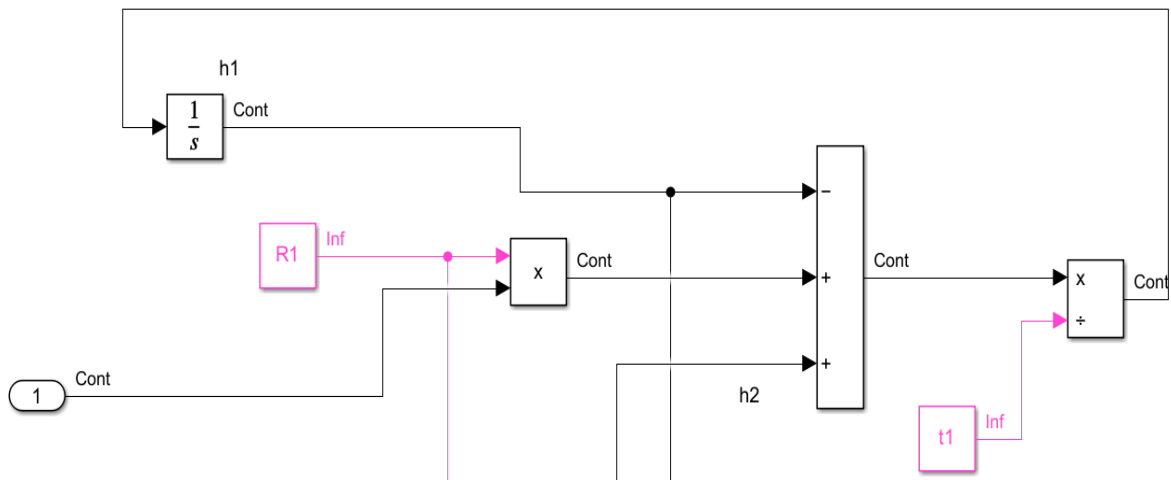


Figura 29. Representación en Simulink de la primera ecuación.

Segunda ecuación: tanque 2 (h_2).

- Flujo de entrada desde el tanque 1.
- Flujos de salida.

$$\text{Hacia } p_1 : q_{p1} = \frac{h_2 - h_{p1}}{R_1}$$

$$\text{Hacia } h_3 : q_{p1} = \frac{h_2 - h_3}{R_2}$$

- Balance de masa.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} (q_m - q_{p1} - q_3)$$

- Sustituyendo los flujos y dividiendo todo para $A_2 R_2 = t_2$ nos queda la ecuación (12) que se representa en la Figura 30.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{t_2} \left(\frac{h_1 - h_2}{R_1} - \frac{h_2 - h_3}{R_2} \right) \quad (12)$$

Aplicando LAPLACE para la segunda ecuación nos queda que:

$$H_2(s) = \frac{\frac{H_1(s)}{t_2 R_1} - \frac{H_3(s)}{t_2 R_2}}{s + \frac{1}{t_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

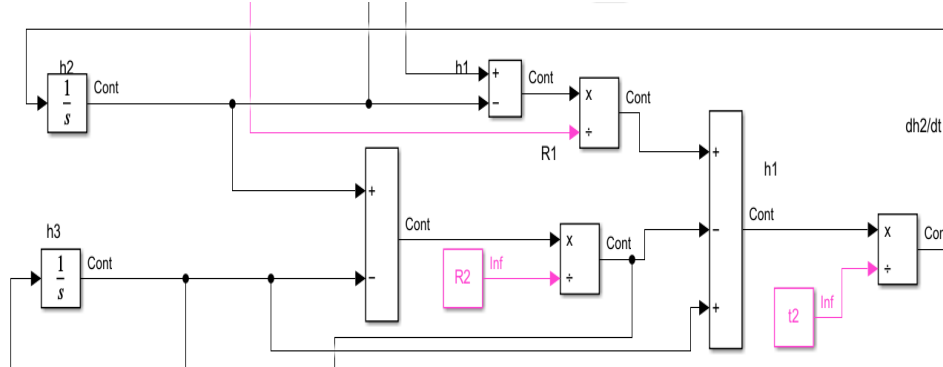


Figura 30. Representación en Simulink de la segunda ecuación.

Tercera ecuación: tanque 3 (h_3).

- Flujo de entrada desde el tanque 2
- Balance de masas

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A_3} (q_{p1})$$

- Sustituyendo q_{p1} y dividiendo todo para $A_{p1}R_2 = t_{p1}$ lo que se muestra en la ecuación (13) que se representa en la Figura 31.

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{t_3} \left(\frac{h_2 - h_3}{R_2} - \frac{h_3}{R_3} \right) \tag{13}$$

Aplicando LAPLACE para la tercera ecuación dos queda:

$$H_3(s) = \frac{\frac{H_2(s)}{t_3 R_2}}{s + \frac{1}{t_3} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)}$$

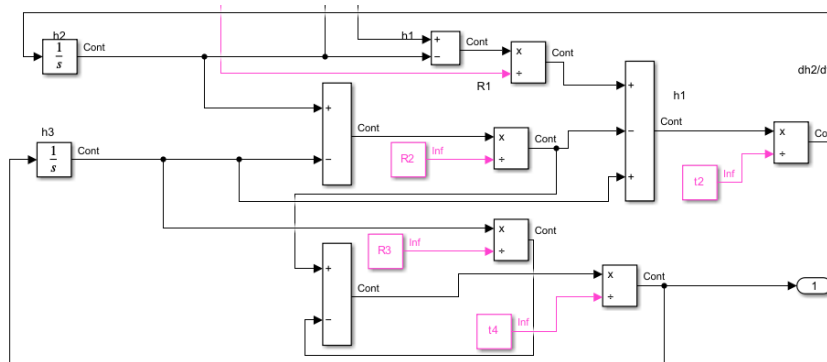


Figura 31. Representación en Simulink de la tercera ecuación.

La función de transferencia total del sistema, que relaciona la entrada $Q_i(s)$ (flujo de entrada con la salida $H_3(s)$ (nivel del tercer tanque), es la siguiente:

$$G(s) = \frac{H_3(s)}{Q_1(s)} = \frac{-R_3 * (H_3 * R_1(st_1 + 1) - R_2(H_2 + R_1Q_i(s)))}{(st_1 + 1)(R_1R_2st_2 + R_1 + R_2)(R_2R_3st_3 + R_2 + R_3)Q_i(s)} \quad (14)$$

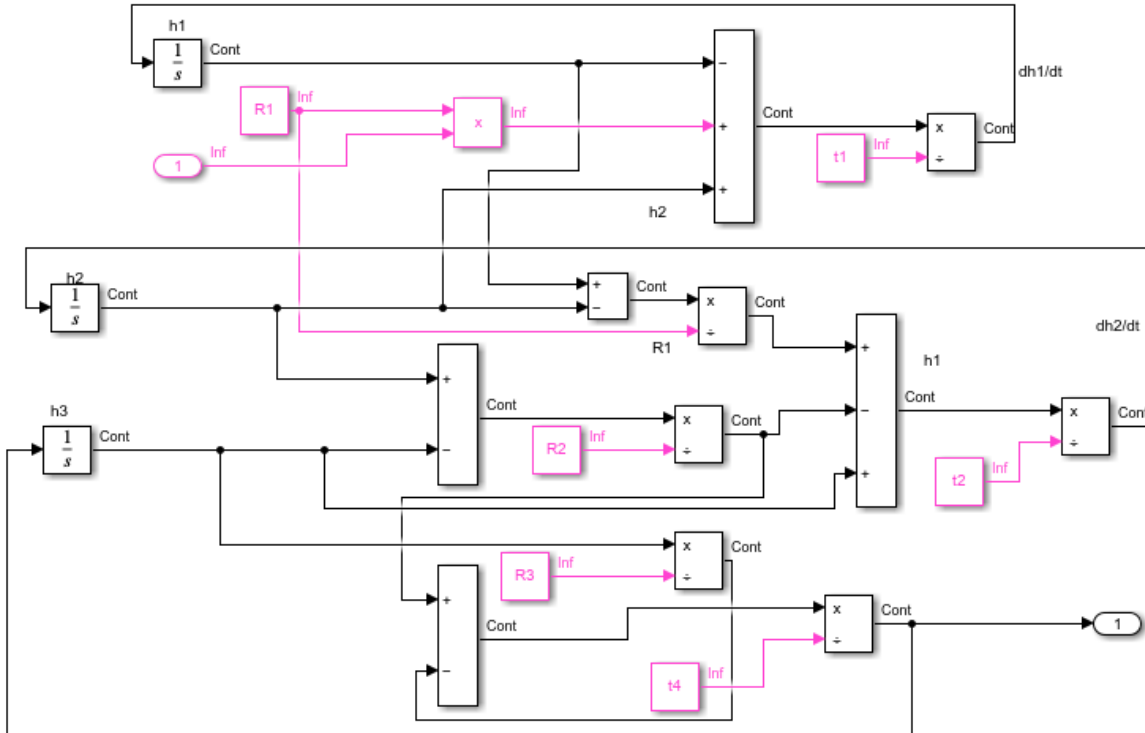


Figura 32. Esquema del Sistema en Simulink de los Tanque 1, Tanque 2 y Tanque 3

Una vez derivadas las ecuaciones del modelo matemático para nuestro estudio, definimos los parámetros y condiciones de los fluidos en el tanque para su modelado en Simulink mostrado en la Figura 32. Además, se establece que el sistema está en equilibrio, lo que implica que el caudal que ingresa al tanque dos y tres es igual al caudal que sale de él.

5.2. CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS.

El control ON-OFF con histéresis se utilizó para regular el llenado y vaciado del sistema, introduciendo un margen que evita cambios rápidos entre estados el cual mejora la estabilidad, reduce el desgaste de los actuadores y asegura un funcionamiento eficiente dentro de los límites establecidos como se puede observar su simulación en la Figura 33, en la cual se puede visualizar el valor del bloque de histéresis que se pudo agregar para poder evitar oscilaciones rápidas e innecesarias en el encendido y apagado del actuador del sistema a controlar de la Figura 24.

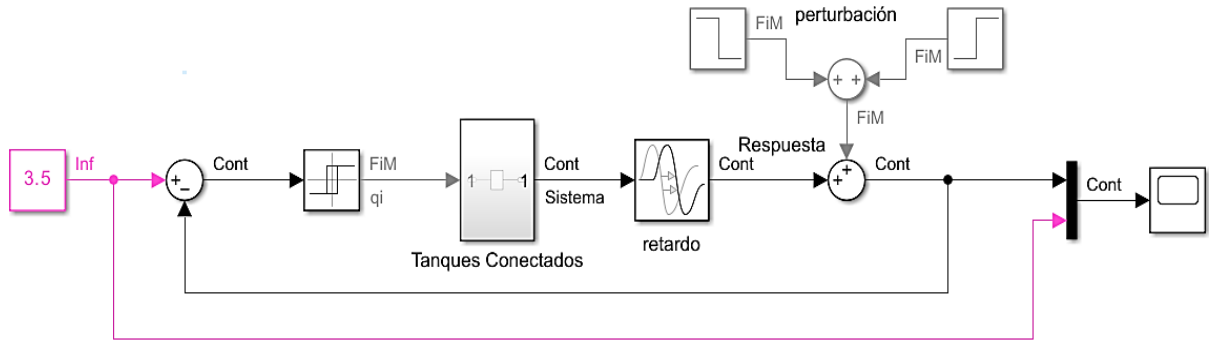


Figura 33. Diagrama del Control ON-OFF con histéresis.

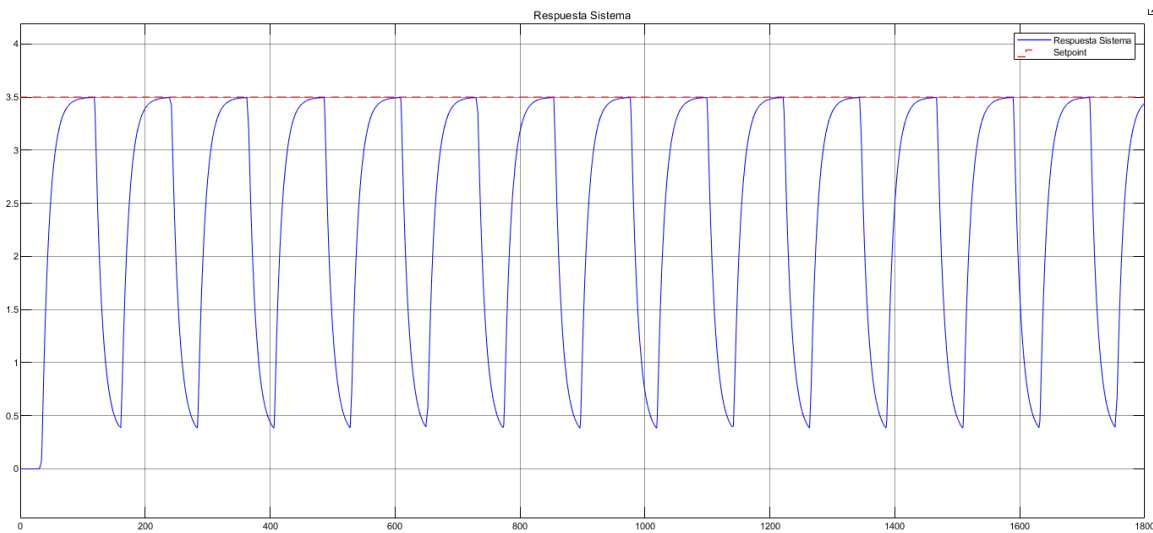



Figura 34. Respuesta ON-OFF con histéresis.

Análisis: Como se muestra en la  No se encuentra el origen de la referencia., el sistema de llenado y vaciado presenta un comportamiento adecuado gracias a la correcta simulación realizada se aprecia que inicialmente, el sistema comienza su operación a los 30 segundos, momento en el cual la señal empieza a estabilizarse y se dirige hacia el setpoint establecido, una vez alcanzado este punto, el control con histéresis permite que el nivel del sistema disminuya hasta el valor mínimo definido, evitando cambios bruscos entre los estados de llenado y vaciado. Adicionalmente se ha realizado la respuesta con un tiempo de retardo de 30 segundos asimilando la respuesta del proceso de ablandamiento, adicionalmente una perturbación para comprobar si el sistema sigue estable al tiempo de 300 segundos.

La histéresis se introduce para mejorar la estabilidad del sistema, evitando que responda a pequeñas fluctuaciones en la señal de error, esto es especialmente útil en sistemas donde las dinámicas pueden generar oscilaciones constantes alrededor del setpoint. Al

implementar la banda de histéresis, se asegura que el sistema opere de manera más eficiente y con menos desgaste de los componentes, ya que los cambios de estado ocurren solo cuando se superan los límites predefinidos este comportamiento se repite cíclicamente a lo largo del tiempo de simulación, logrando una trayectoria controlada y consistente.

5.3. SIMULACIÓN DE CONTROL PI

El control PI ha sido implementado en el diagrama de bloques, como se ilustra en la Figura 35, utilizando la herramienta de simulación de Simulink en MATLAB a través de la sintonización (tuning) adecuada del controlador PI, se logró estabilizar la respuesta del sistema, optimizando su desempeño y asegurando que opere de manera eficiente dentro de los parámetros establecidos a pesar de las perturbaciones aplicadas hacia el sistema, esta implementación permitió corregir las desviaciones iniciales y alcanzar un comportamiento estable, demostrando la efectividad del método de control aplicado para el sistema de la Figura 24.

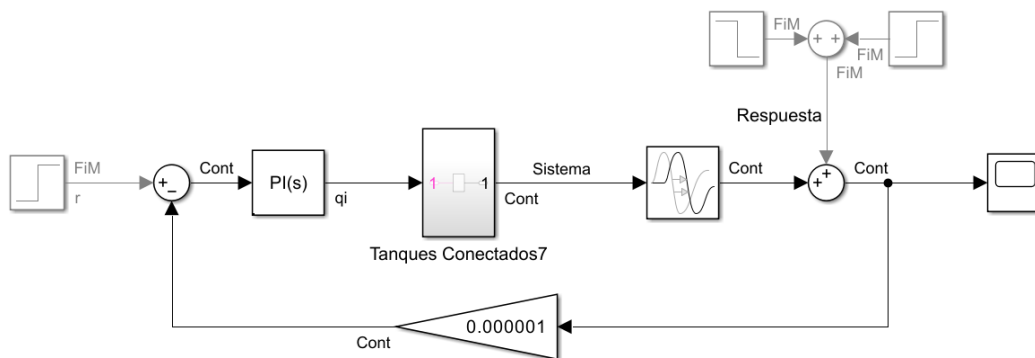


Figura 35. Diagrama del Control PI con perturbación.



Figura 36. Respuesta de control PI del sistema con perturbación.

Análisis: En la Figura 35, se presenta un diagrama de bloques detallado junto con la configuración de los accionadores ilustrados en la Figura 36, lo que permite visualizar el funcionamiento dinámico del sistema, este inicia su operación de manera precisa durante los primeros 30 segundos, evidenciando la efectividad del control implementado. En esta etapa inicial, el sistema responde rápidamente a la señal de entrada y comienza a llenar el tanque hasta alcanzar el nivel deseado o setpoint, previamente definido como el valor objetivo para garantizar el desempeño óptimo del proceso.

El comportamiento del sistema durante el llenado muestra un control adecuado y estable, manteniéndose dentro de los parámetros establecidos este control asegura que el nivel del tanque no exceda los límites definidos ni caiga por debajo de los valores críticos, lo que resulta crucial para mantener la eficiencia operativa y prevenir problemas asociados con niveles inadecuados, como el desbordamiento o la insuficiencia de suministro.

Aproximadamente a los 150 segundos de operación, se observa que el nivel del tanque alcanza una estabilidad notable. Durante este periodo, la dinámica del sistema se regula de manera efectiva, reflejando la robustez del diseño del control, incluso frente a pequeñas fluctuaciones inherentes al proceso. Este comportamiento estable resalta la precisión del modelo y su capacidad para ajustarse a las condiciones específicas del sistema.

Sin embargo, a partir de los 300 segundos de simulación, se introduce una perturbación al sistema que provoca un comportamiento transitorio. Durante este lapso, que se extiende hasta los 310 segundos, el sistema experimenta una desviación significativa del nivel de referencia. Esta perturbación podría estar asociada a variaciones externas, como cambios en el caudal de entrada, fluctuaciones en los parámetros del proceso o condiciones inesperadas en la operación. Es importante destacar que, tras este evento, el sistema muestra una recuperación eficiente, retornando gradualmente a su estado estable inicial.

5.4. COMPARACIÓN CONTROL ON- OFF CON HISTÉRESIS Y PI

Los tanques 2 y 3 mostrados en la Figura 24 contienen agua blanda, fundamental para los distintos procesos que la fábrica requiere (por ejemplo, llenado de piscinas de pintura u otras aplicaciones). Cada tanque dispone de una válvula de salida que actúa en función de la demanda, regulando el nivel de líquido y garantizando el suministro de agua en la cantidad necesaria. Gracias a la acción proporcional-integral, el sistema compensa la perturbación de forma continua y reduce el error en estado estacionario. Esto se traduce en

una transición suave hacia el nivel objetivo, con una oscilación mínima en comparación con un control ON-OFF.

La respuesta mostrada en la Figura 34 es característica de un controlador ON-OFF con histéresis: el nivel oscila de forma periódica alrededor de un intervalo definido por los umbrales de conmutación. Aunque este tipo de control genera variaciones cíclicas en los tanques, resulta sencillo y robusto para aplicaciones en las que se tolera cierta amplitud de oscilación. Así, se garantiza un suministro constante de agua blanda a la planta, evitando cambios muy rápidos que podrían desgastar los actuadores y manteniendo los niveles dentro de un rango aceptable para la operación.

En la mayoría de aplicaciones de control de nivel, el PI logra un desempeño adecuado: reduce el error en estado estacionario gracias al término integral y ofrece una respuesta suave y estable gracias al término proporcional. La mejora adicional que podría ofrecer el término derivativo suele no compensar su complejidad y los posibles efectos negativos (ruido, oscilaciones no deseadas).

No se requieren variadores porque el proceso de control de nivel en tanques es inherentemente lento y tiene una dinámica que no demanda un ajuste continuo de la velocidad de la bomba. De este modo, el controlador responde automáticamente a la necesidad real del proceso: si el tanque empieza a llenarse demasiado, reduce el caudal de entrada; si comienza a vaciarse, lo aumenta, manteniendo el nivel dentro de los valores óptimos establecidos.

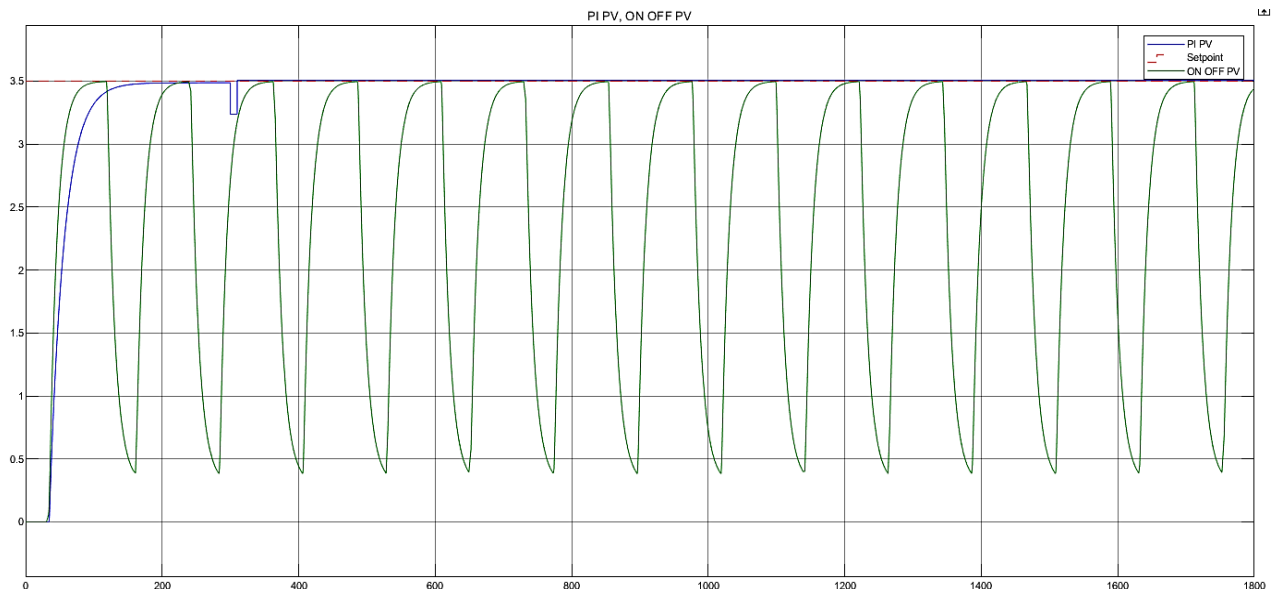


Figura 37. PI vs ON-OFF con histéresis PV

Análisis: Como se puede observar en la Figura 37, las diferencias son notables en cuanto a tiempos de estabilización, respuesta ante perturbaciones y estabilidad a largo plazo, lo que influye en su desempeño dependiendo de las necesidades del sistema.

En cuanto al tiempo de estabilización inicial, el control con histéresis presenta un inicio gradual que alcanza el setpoint a los 150 segundos, lo que refleja un enfoque más conservador para priorizar la estabilidad, en cambio, el control PI alcanza el setpoint en aproximadamente 120 segundos, mostrando una respuesta más rápida y directa, pero con menos énfasis en la estabilidad inmediata. Respecto a la respuesta ante perturbaciones, el control con histéresis experimenta una desviación significativa ante una perturbación entre los 300 y 310 segundos, pero se recupera de manera gradual y sin generar oscilaciones abruptas, lo que favorece la estabilidad a largo plazo, aunque a costa de un tiempo de recuperación más largo, en cambio el control PI responde rápidamente a la misma perturbación, minimizando la desviación en un menor tiempo, el control con histéresis mantiene un rango de operación dentro de una banda predefinida, lo que disminuye el desgaste de los actuadores y ofrece una solución más robusta ante fluctuaciones menores, aunque con una menor precisión. El control PI, por otro lado, asegura que el sistema se mantenga cercano al setpoint con mayor precisión, pero puede provocar oscilaciones constantes si no se ajusta correctamente la sintonización.

5.5. MATERIALES Y PRESUPUESTO


En la Tabla 3 se detalla el presupuesto de los materiales a utilizarse según el diagrama del ANEXO Q, en la planta de tratamiento de agua de la fábrica CIAUTO. Es importante mencionar que para esta instalación la empresa ya cuenta con algunos equipos, como el PLC S7 1200, la empresa actualmente usa ese modelo para las entradas y salidas de los sensores tipo boya que poseen actualmente. Adicionalmente la empresa cuenta con su propio tablero de conexiones, únicamente se debería hacer las adecuaciones para la colocación de la pantalla KTP. Adicionalmente se necesitará una expansión de entradas para el PLC con necesidad de 3 entradas 1 para cada tanque, y las entradas que quedan libres serán para futuros proyectos.

Cabe recalcar que solo se procede hacer la implementación en los 3 tanques donde se realizó el control en el software MATLAB Simulink ya que los tanques 4, 5, 6 y 7 estarán funcionando con el sensor tipo boya actual del sistema de la Figura 23.

El uso de la pantalla KTP, realizará la acción de monitoreo de los tanques, la ubicación será en el tablero principal de conexiones. Por otro lado, los sensores que se instalaran marca SITRANS LU150, para el monitoreo del tanque de agua clarificada, y los dos tanques de agua blanda con el fin de tener el monitoreo para cuando se necesite satisfacer la demanda de la planta.

También se analiza supuestos precios de la Tabla 3, sobre la instalación y programación por parte de técnicos que no sean de la empresa (exteriores) y el presupuesto con la instalación de técnicos de la fábrica CIAUTO. Existen dos presupuestos que corresponden a la instalación de equipos mostrados en la Tabla 3 donde su precio es variable dependiendo de la instalación técnica de esta propuesta de control de nivel en los tanques de la planta de tratamiento de agua en la empresa CIAUTO.

Tabla 3. Presupuesto

ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS	PRECIO TOTAL
<p>EXPANSIÓN 8DI/8DO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo ampliación. • DM16 230R. • FA/E/S: 230V/230V/relé. • 4 TE. • 8 DI/8 DO 	<p>213\$ dólares</p>
<p>PANTALLA HDMI KTP</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SIMATIC HMI, KTP400 Basic, • Panel básico, operación Key/Touch, pantalla TFT de 4 ". • Interfaz PROFINET 	<p>500\$ dólares</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Configurable desde WinCC Basic V13/ STEP 7 Basic V13. 	
<p>SENSORES SITRANS LU150</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango: Hasta 5 metros. • Salida: 4-20 mA. • Alimentación: 24V DC. • Protección: IP68 (uso en exteriores) • Tensión de alimentación: 12 a 30 V DC • Temperatura de operación: -40 a +85°C. 	<p>3357\$ dólares (total para 3 sensores)</p>
<p>FUENTE DE 24 V DC 24V 20A</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • P=120 W • Voltaje mínimo de entrada - Voltaje máximo de entrada • 110V - 220V • Voltaje mínimo de salida - Voltaje máximo de salida • 23V - 25V 	<p>20\$ dólares</p>
<p>CABLES DE CONEXIÓN</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Rollos de cable número 14 y 12 	<p>235\$ dólares</p>
<p>PROGRAMACIÓN</p>	<p>Técnico</p>	<p>300\$ dólares</p>

EQUIPO TÉCNICO	Técnico	1500\$ dólares
COSTOT TOTAL CONSIDERANDO PROGRAMAMCIÓN Y EQUIPO TÉCNICO EXTRERNO	TOTAL: 6125 \$ dólares	
COSTO TOTAL CONSIDERANDO PROGRAMAMCION Y EQUIPO DE CIAUTO.	TOTAL: 4325 \$ dólares	

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- La recopilación exhaustiva de la información sobre el sistema de bombeo en la planta de tratamiento de agua, así como el análisis de sus métodos de control y la variabilidad de los niveles en los tanques, evidencia que el sistema actual funciona de manera aceptable, pero presenta limitaciones en cuanto a la eficiencia energética y la precisión en el control de nivel. El diagnóstico revela oportunidades de mejora tanto en la automatización como en la supervisión de los equipos, lo que permitiría un manejo más estable y confiable de los recursos hídricos.
- La elaboración de las funciones de transferencia de cada tanque y la implementación del control en Simulink han permitido representar fielmente el comportamiento del sistema de llenado de tanques. Gracias a la sintonización adecuada de los parámetros del controlador y a las pruebas de simulación, se ha logrado un modelo que mejora la estabilidad del nivel en los tanques y proporciona una base sólida para futuras implementaciones en la planta real.
- El controlador ON-OFF con histéresis opera introduciendo una banda de tolerancia que evita cambios bruscos entre los estados de encendido y apagado. Con un tiempo de estabilización de alrededor de 150 segundos, además presenta un comportamiento que oscila entre 30 centímetros y 3.5 metros, donde el nivel se llena rápidamente hasta 3.5 metros y luego se vacía gradualmente hasta 0.30 metros. Cada ciclo completo de llenado y vaciado se repite aproximadamente cada 200-300 segundos, lo que muestra un comportamiento periódico adecuado para el control de nivel en sistemas de este tipo.

- El modelo PI demostró alcanzar el setpoint en aproximadamente 120 segundos, evidenciando una respuesta ágil y precisa. Esta rapidez en la estabilización permite que el sistema se adapte de manera efectiva a las variaciones del proceso, reduciendo la intervención manual y optimizando el consumo energético. El sistema responde a un ajuste hacia la consigna de 3.5 metros con una transición rápida en los primeros momentos. A pesar de una pequeña perturbación en el tiempo de 300 segundos, el sistema finalmente se estabiliza y se mantiene estable en los 3.5 metros sin más oscilaciones significativas.
- La comparación entre ambos métodos muestra que, si bien el controlador ON-OFF con histéresis aporta estabilidad y minimiza el desgaste de los actuadores, el modelo PI destaca por su rapidez y precisión al alcanzar el setpoint y responder a perturbaciones. Esta capacidad de mantener el nivel de agua de forma más eficiente y con menor tiempo de recuperación se alinea mejor con el objetivo de optimizar el desempeño general del sistema, justificando la elección del modelo PI sobre el ON-OFF con histéresis en escenarios donde la agilidad es fundamental.
- La incorporación de un sensor ultrasónico al sistema para proporcionar mediciones en tiempo real y con alta precisión del nivel del agua. Este monitoreo continuo permite ajustar de inmediato la operación, corrigiendo desviaciones y asegurando que el proceso se mantenga dentro de los parámetros óptimos. Así, se cumple el objetivo de recopilar datos precisos y mejorar el control automatizado, lo que se traduce en un manejo más efectivo y seguro del recurso hídrico en la planta.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere implementar un plan de optimización que abarque la modernización del sistema de control y la integración de tecnologías de monitoreo continuo. Esto incluiría la instalación de sensores de nivel más precisos, la actualización del software de control (por ejemplo, con controladores PI o PID bien sintonizados) y la capacitación del personal en la operación de estos equipos.
- Validar el modelo y el controlador PI y ON-OFF comparados con datos reales de la planta, de modo que se puedan ajustar con precisión los parámetros de control en función de las condiciones operativas específicas y, así, garantizar que el desempeño observado en la simulación se traduzca efectivamente en el entorno industrial.

- Se recomienda implementar un proyecto piloto en la planta para validar en entornos reales la eficacia del controlador PI y la integración del sensor ultrasónico, asegurando que las simulaciones se reflejen en el desempeño operativo.
- Diseñar y aplicar un plan de mantenimiento estructurado que incluya revisiones periódicas de los actuadores, sensores y demás componentes, para prolongar la vida útil del sistema y asegurar su operatividad constante.
- Brindar formación continua a los operadores y técnicos de mantenimiento sobre el funcionamiento del nuevo sistema, incluyendo el uso del sensor ultrasónico y la interpretación de datos, lo que permitirá optimizar la operación y facilitar la resolución de incidencias.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CIAUTO, «ciauto.ec,» 2023. [En línea]. Available: <https://ciauto.ec/>.
- [2] J. M. Escaño Gonzales, A. Garcia y J. García Caballero, «Integración de sistemas de automatización industrial,» *PARANINFO S.A.*, vol. 1, nº 8, p. 91, 2019.
- [3] J. C. Bucay Valdiviezo y M. E. Carrillo Albán, «OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LADISPONIBILIDAD OPERACIONAL DE EQUIPOS EN LA PLANTA DE PINTURA DE LA EMPRESA CIAUTO AMBATO-ECUADOR,» Riobamba, 2018.
- [4] E. J. Adan, 1 2014. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303721839_Instrumentacion_y_Control_de_Procesos_Notas_de_Clases. [Último acceso: 8 10 2024].
- [5] H. Sanchez, «SCRIBD,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/84612488/Sistemas-en-Lazo-Cerrado-y-Abierto>. [Último acceso: 8 10 2024].
- [6] J. L. Torres Capuz y S. X. Chanoluisa Martinez, 3 2015. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10414>. [Último acceso: 8 10 2024].
- [7] B. C. Kuo, *Sistemas de Control Automatico* 7ma edición, Mexico: Prencitce-Hall Inc., 1996.
- [8] k. Ogata, *Ingeniería de control moderna* 3ra edición., Mexico: PRENTICE-HALL, 1998.

- [9] S. B. Basantes Espinoza y J. A. López Dias, 3 3 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22821>. [Último acceso: 8 11 2024].
- [10] J. A. Saez, «Blog de WIKA,» 18 8 2020. [En línea]. [Último acceso: 15 11 2024].
- [11] Apurado, «APURE,» 26 1 2024. [En línea]. Available: <https://apureinstrument.com/blogs/ultrasonic-vs-radar-level-sensor/>. [Último acceso: 15 11 2024].
- [12] J. C. Villajulca, «InstrumentacionyControl,» 18 6 2018. [En línea]. Available: https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/?utm_source=chatgpt.com. [Último acceso: 8 10 2024].
- [13] «Electrcial4U,» 5 6 2024. [En línea]. Available: https://www.electrical4u.com/on-off-control-theory-controller/#google_vignette. [Último acceso: 11 10 2024].
- [14] «FLUID HANDLING TECHNOLOGY, S.A.,» 23 5 2023. [En línea]. Available: <https://www.fhtvalves.com/valvulas-de-regulacion-vs-valvulas-on-off-caracteristicas-y-ventajas/>. [Último acceso: 11 10 2024].
- [15] F. J, 9 2013. [En línea]. Available: <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2022/02/16/que-es-el-control-pid/>. [Último acceso: 11 10 2024].
- [16] K. Ogata, Ingeniería de control moderna 5ta edición, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2010.
- [17] P. Woolf, «Libre Texts,» 2022. [En línea]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_\(PID\)/9.06%3A_Desventajas_y_soluciones_de_PID](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.06%3A_Desventajas_y_soluciones_de_PID). [Último acceso: 15 11 2024].
- [18] A. Cribas y L. Martinez, «Academia edu,» 2021. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/51022587/Paper_Sistema_de_Control_de_Llenado_y_Nivel_de_Tanques. [Último acceso: 15 11 2024].
- [19] A. AT y 29023, 2019. [En línea]. Available: <https://atautomation.com.mx/>. [Último acceso: 16 2 2025].