

# **Rediseño del sistema eléctrico y de control del banco de pruebas de bombas centrífugas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca**

Catalina Guacan Betancourt

Camilo Benavides



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales

Programa de Ingeniería Electrónica

Popayán – Cauca

2026

# **Rediseño del sistema eléctrico y de control del banco de pruebas de bombas centrífugas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca**

Catalina Guacan Betancourt

Camilo Benavides

Trabajo de Grado modalidad Investigación para optar el título profesional de Ingeniero  
Electrónico

Director

Juan Pablo Diago Rodríguez



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales

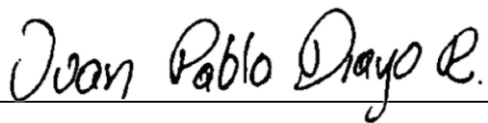
Programa de Ingeniería Electrónica

Popayán – Cauca

2026

### Nota de Aceptación

Una vez revisado y aprobado el documento final del trabajo de grado titulado ***Rediseño del sistema eléctrico y de control del banco de pruebas de bombas centrífugas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca***, realizado por los estudiantes Catalina Guacan Betancourt y Camilo Benavides, se autoriza para optar el título de profesional Ingeniería Electrónica en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



**Director.**

Juan Pablo Diago Rodríguez



**Jurado 1.**

Yesid Enrique Castro Caicedo



**Jurado 2.**

Ivan Daniel Ortiz Velasco

Popayán, 2026

## **Dedicatoria**

*A Dios, por ser mi guía y darme la fortaleza para superar cada desafío.*

*A mi abuela Dina Esperanza Muñoz Garcés, quien desde el cielo me acompaña y me  
brinda fuerzas en cada paso.*

*A mis padres, Gloria Patricia Betancourt y Harold Andrés Guacan, por su gran amor  
incondicional y apoyo constante.*

*A mi tío Carlos Alberto Guacan y mi tía Andrea Guacan, por estar siempre presentes  
con su respaldo y palabras de aliento.*

*A mi fiel compañera, Catys Guacan Betancourt, quien con su compañía me dio fuerzas  
en cada jornada de trabajo.*

**Catalina Guacan Betancourt**

*A Dios por ser mi guía constante y mi fortaleza que me permitió superar este desafío.*

*A mi familia, por su amor incondicional y constante apoyo, que fueron mi mayor  
motivación en cada etapa de este proyecto. Y a mis profesores, por su invaluable guía y  
conocimientos que hicieron posible su culminación.*

**Camilo Benavides**

## **Agradecimientos**

El presente trabajo de grado bajo la modalidad de monografía es el producto del esfuerzo, dedicación y ayuda de varias personas e instituciones, que mediante su apoyo permitieron su desarrollo y terminación.

Por lo anterior es importante expresar un especial agradecimiento al Ingeniero Juan Pablo Diago, quien fue tutor de este trabajo; a él gracias por su guía, conocimientos y compromiso en el proceso de investigación. De igual manera, se extiende la gratitud a la cotutora Andrea Aguilar, por su acompañamiento y valiosas observaciones que contribuyeron al fortalecimiento de este estudio.

A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, por brindar la oportunidad y los recursos necesarios para la realización de este trabajo de grado, así como a los docentes que, con su enseñanza y orientación, enriquecieron el proceso formativo.

A la familia, por su apoyo incondicional, motivación y confianza a lo largo de esta trayectoria académica. A los compañeros y amigos, por su compañía y colaboración en los momentos clave del desarrollo de este trabajo.

Finalmente, se extiende un agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron al logro de este objetivo.

## Tabla de Contenido

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen.....                                                                  | 12 |
| Abstract.....                                                                 | 13 |
| Introducción.....                                                             | 14 |
| Capítulo 1. Planteamiento del Problema .....                                  | 15 |
| 1.1. Planteamiento del Problema.....                                          | 15 |
| 1.2. Problemática Identificada .....                                          | 16 |
| 1.3. Justificación.....                                                       | 17 |
| 1.4. Objetivos .....                                                          | 19 |
| 1.4.1. Objetivo General .....                                                 | 19 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos .....                                            | 19 |
| 1.5. Enfoque metodológico.....                                                | 19 |
| 1.6. Contribuciones del trabajo .....                                         | 21 |
| 1.6.1. Contribución Técnica y de Infraestructura.....                         | 21 |
| 1.6.2. Contribución Pedagógica y Académica.....                               | 22 |
| 1.6.3. Contribución Institucional y Documental .....                          | 22 |
| Capítulo 2. Fundamentación Teórica .....                                      | 23 |
| 2.1. La Automatización.....                                                   | 23 |
| 2.2. Normatividad y Seguridad en el Diseño .....                              | 24 |
| 2.2.1. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) .....           | 24 |
| 2.2.2. Normatividad de la Sociedad Internacional de Automatización (ISA)..... | 26 |
| 2.3. Arquitectura del Sistema de Control.....                                 | 27 |
| 2.3.1. Controladores Lógicos Programables (PLC) .....                         | 27 |
| 2.3.2. Sistemas de Supervisión (HMI y SCADA).....                             | 29 |
| 2.4. Sistemas y Técnicas de Control .....                                     | 30 |
| 2.4.1. Sistemas de control de lazo abierto .....                              | 31 |
| 2.4.2. Sistemas de control de lazo cerrado .....                              | 32 |
| 2.5. Métodos de sintonización del control PID.....                            | 36 |
| 2.5.1. Método Ziegler y Nichols .....                                         | 36 |
| 2.5.2. Método de Cohen-Coon .....                                             | 36 |
| 2.5.3. Método de ensayo y error.....                                          | 37 |
| Capítulo 3. Implementación .....                                              | 38 |
| 3.1. Implementación del Sistema Eléctrico.....                                | 38 |
| 3.1.1. Diagnóstico de la problemática.....                                    | 38 |

|                   |                                                                      |    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2.            | Estrategia de solución y aplicación normativa .....                  | 39 |
| 3.2.              | Documentación del Sistema: Planos Eléctricos e Instrumentación ..... | 47 |
| 3.2.1.            | Diseño de guías .....                                                | 47 |
| 3.3.              | Implementación del Sistema de Control .....                          | 47 |
| 3.3.1.            | Diagrama ISA.....                                                    | 48 |
| 3.3.2.            | Planos Elaborados según la Norma ISA .....                           | 48 |
| 3.3.3.            | Linealización por Tramos para el Sensor de Nivel.....                | 51 |
| 3.3.4.            | Implementación del Controlador ON/OFF .....                          | 52 |
| 3.3.5.            | Implementación del Controlador PID y Método de Sintonización .....   | 53 |
| 3.3.6.            | Ajuste de Parámetros mediante Ensayo y Error .....                   | 55 |
| Capítulo 4.       | Resultados .....                                                     | 57 |
| 4.1.              | Resultados del Control ON/OFF .....                                  | 57 |
| 4.1.1.            | Llenado desde estado de reposo y estabilización .....                | 57 |
| 4.1.2.            | Comportamiento ante una Perturbación.....                            | 59 |
| 4.2.              | Control PID.....                                                     | 61 |
| 4.2.1.            | Ganancia Proporcional Kp.....                                        | 62 |
| 4.2.2.            | Tiempo Integral Ti.....                                              | 68 |
| 4.2.3.            | Tiempo Derivativo Td .....                                           | 74 |
| 4.3.              | Validación con estudiantes .....                                     | 81 |
| 4.3.1.            | Encuesta guía Control PID .....                                      | 83 |
| 4.3.2.            | Encuesta guía control ON/OFF.....                                    | 85 |
| Capítulo 5.       | Discusión.....                                                       | 87 |
| Capítulo 6.       | Conclusiones y Trabajos Futuros .....                                | 90 |
| Referencias ..... |                                                                      | 92 |
| Anexos .....      |                                                                      | 94 |

## Lista de Tablas

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla I. Especificaciones de los componentes del panel de control .....        | 40 |
| Tabla II. Implementación de mejoras en el sistema eléctrico y de control ..... | 41 |
| Tabla III. Elementos del panel de control .....                                | 43 |
| Tabla IV. Equipos de la planta de nivel de agua.....                           | 45 |
| Tabla V. Parámetros de configuración del bloque PID.....                       | 55 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1. Fases de la investigación.....                                                                | 21 |
| Fig. 2. Arquitectura de un Controlador Lógico Programable (PLC) .....                                 | 28 |
| Fig. 3. Sistema de control de Lazo abierto .....                                                      | 32 |
| Fig. 4. Diagrama de Sistema de Control en lazo cerrado.....                                           | 32 |
| Fig. 5. Control ON/OFF.....                                                                           | 33 |
| Fig. 6. Control PID .....                                                                             | 34 |
| Fig. 7. Fórmula matemática PID.....                                                                   | 35 |
| Fig. 8. Plano de Instrumentación .....                                                                | 49 |
| Fig. 9. Plano Conexiones Esquema antiguo.....                                                         | 50 |
| Fig. 10. Plano Conexiones Esquema Nuevo .....                                                         | 50 |
| Fig. 11 Valores del Sensor Simulado por un Potenciómetro .....                                        | 52 |
| Fig. 12. Bloque PID .....                                                                             | 54 |
| Fig. 13. Respuesta de la variable de proceso.....                                                     | 58 |
| Fig. 14. Respuesta de la variable de proceso llegando al límite superior .....                        | 58 |
| Fig. 15. Respuesta de la variable de proceso oscilando entre los límites superior e inferior .....    | 59 |
| Fig. 16. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación .....                         | 60 |
| Fig. 17. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, recuperación .....           | 60 |
| Fig. 18. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, referencia. recuperado ..... | 61 |
| Fig. 19. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, presenta oscilaciones .....  | 61 |
| Fig. 20. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control .....               | 63 |
| Fig. 21. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control .....               | 63 |
| Fig. 22. Comportamiento de la variable de proceso reduciendo el error.....                            | 64 |
| Fig. 23. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control .....               | 64 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 24. Arranque del sistema con $K_p=1000$ y pendiente de llenado pronunciada .....    | 65 |
| Fig. 25. Comportamiento de la variable de proceso con error de 2 cm.....                 | 65 |
| Fig. 26. Comportamiento de la variable de proceso alcanzando la referencia .....         | 66 |
| Fig. 27. Comportamiento de la variable de proceso con respuesta rápida .....             | 67 |
| Fig. 28. Comportamiento de la variable de proceso alcanzando la referencia .....         | 67 |
| Fig. 29. Comportamiento de la variable de proceso con error en estado estacionario ..... | 68 |
| Fig. 30. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna .....           | 68 |
| Fig. 31. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna .....           | 69 |
| Fig. 32. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna .....           | 70 |
| Fig. 33. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección .....         | 71 |
| Fig. 34. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna .....           | 71 |
| Fig. 35. Comportamiento de la variable de proceso estabilizándose .....                  | 72 |
| Fig. 36. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección .....         | 73 |
| Fig. 37. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 73 |
| Fig. 38. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 74 |
| Fig. 39. Comportamiento de la variable de proceso inicio de corrección .....             | 75 |
| Fig. 40. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 75 |
| Fig. 41. Comportamiento de la variable de proceso inicio de corrección .....             | 76 |
| Fig. 42. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 77 |
| Fig. 43. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 77 |
| Fig. 44. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección .....         | 78 |
| Fig. 45. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización .....                | 78 |
| Fig. 46. Comportamiento de la variable de proceso con constantes sintonizadas .....      | 79 |
| Fig. 47. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación .....            | 80 |
| Fig. 48. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación .....            | 81 |
| Fig. 49. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación .....            | 81 |
| Fig. 50. Validación con estudiantes – Guías.....                                         | 82 |
| Fig. 51. explicación del PID.....                                                        | 83 |
| Fig. 52. Comprensión del PID .....                                                       | 84 |
| Fig. 53. Explicación del control ON/OFF .....                                            | 85 |
| Fig. 54. Comprensión del ON/OFF.....                                                     | 85 |

## Lista de Anexos

|                                              | Pág. |
|----------------------------------------------|------|
| <b>Anexo 1.</b> Guía Control PID.....        | 94   |
| <b>Anexo 2.</b> Guía Control ON/OFF .....    | 96   |
| <b>Anexo 3.</b> Códigos Control ON/OFF ..... | 99   |
| <b>Anexo 4.</b> Códigos Control PID.....     | 101  |
| <b>Anexo 5.</b> Encuestas.....               | 103  |

## Lista de Símbolos y Nomenclatura

| <b>Símbolo/Nomenclatura</b>   | <b>Descripción</b>                                            |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>PLC</b>                    | Controlador Lógico Programable                                |
| <b>HMI</b>                    | Interfaz Hombre-Máquina                                       |
| <b>SCADA</b>                  | Supervisión, Control y Adquisición de Datos                   |
| <b>RETIE</b>                  | Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas                |
| <b>ISA</b>                    | Sociedad Internacional de Automatización                      |
| <b>PID</b>                    | Controlador Proporcional-Integral-Derivativo                  |
| <b>ON/OFF</b>                 | Control de activación y desactivación binaria                 |
| <b>V</b>                      | Voltaje (Voltios)                                             |
| <b>A</b>                      | Amperaje (Amperios)                                           |
| <b><math>\Omega</math></b>    | Resistencia (Ohmios)                                          |
| <b>Hz</b>                     | Frecuencia (Hertzios)                                         |
| <b>kW</b>                     | Kilovatio - Potencia Eléctrica                                |
| <b>DC</b>                     | Corriente Directa                                             |
| <b>AC</b>                     | Corriente Alterna                                             |
| <b>mA</b>                     | Miliamperios                                                  |
| <b>LED</b>                    | Diodo Emisor de Luz                                           |
| <b>Disyuntor</b>              | Dispositivo de protección eléctrica                           |
| <b>Electroválvula</b>         | Válvula de control activada por señal eléctrica               |
| <b>Servoválvula</b>           | Válvula de ajuste de flujo controlada por señal PID           |
| <b>Sensor de Nivel</b>        | Dispositivo para medir la altura de un líquido                |
| <b>Sensor de Flujo</b>        | Dispositivo para medir la velocidad o caudal de un fluido     |
| <b>Bomba Centrífuga</b>       | Mecanismo de transporte de líquidos mediante energía mecánica |
| <b>Fuente de Alimentación</b> | Dispositivo que convierte y regula la energía eléctrica       |

## Resumen

El banco de pruebas de bombas centrífugas que hace parte del laboratorio de control de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca ha presentado deficiencias mecánicas y eléctricas con el paso del tiempo, lo cual ha afectado su operatividad en las prácticas académicas. Estas limitaciones reducen la eficiencia de dicho equipo en la enseñanza, provocando dificultades en la experiencia práctica de los estudiantes.

Este estudio analiza el estado actual del equipo y plantea mejoras en su funcionamiento. Para ello, se realiza una inspección técnica con el fin de identificar fallas y establecer los ajustes necesarios. Asimismo, se recopila información técnica que fundamenta las modificaciones propuestas. Con base en este análisis, se diseña un esquema eléctrico actualizado, seguido de pruebas de funcionamiento que evalúan el impacto de las mejoras implementadas. Finalmente, se desarrollan guías de laboratorio para facilitar su uso en actividades académicas.

El proyecto busca mejorar el desempeño del banco de pruebas y generar información relevante para futuras actualizaciones, permitiendo su adecuada integración en el proceso de formación en ingeniería.

**Palabras clave:** Control de procesos, automatización, sistemas eléctricos, enseñanza en ingeniería, prácticas de laboratorio, mejora de equipos.

### **Abstract**

In this paper, the centrifugal pump test bench, part of the process control laboratory at Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, is analyzed due to mechanical and electrical deficiencies that have affected its functionality over time. These limitations reduce the equipment's effectiveness in teaching and hinder students' practical experience.

This study analyzes the current state of the equipment and proposes improvements to its functionality. To this end, a technical inspection is conducted to identify faults and make the necessary adjustments. Additionally, technical information is collected to support the proposed modifications. Based on this analysis, an updated electrical schematic is designed, followed by operational tests that evaluate the impact of the implemented improvements. Finally, laboratory guides are developed to facilitate its use in academic activities.

This project aims to improve the performance of the test bench and generate relevant information for future equipment improvements, enabling its proper integration into the engineering education process.

**Keywords:** Process control, automation, electrical systems, engineering education, laboratory practices, equipment improvements.

## Introducción

A través de la experimentación se fortalece significativamente el proceso de enseñanza en Ingeniería Electrónica: las prácticas de laboratorio permiten trasladar y consolidar las teorías vistas en clase, facilitando la comprensión mediante la aplicación práctica. En este sentido, la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca dispone de un laboratorio de control de procesos que cuenta con un banco de pruebas para el estudio de fluidos, ampliamente utilizado en la medición y control de variables críticas como nivel y caudal.

Sin embargo, el uso intensivo de estos equipos ha provocado el desgaste de componentes y la aparición de fallos en su estructura mecánica y en su sistema eléctrico, lo que compromete su disponibilidad y seguridad durante las sesiones prácticas. Por ello resulta imprescindible evaluar de manera sistemática el estado del banco de pruebas y definir un plan de intervención que permita recuperar y mejorar su operatividad, garantizando condiciones adecuadas para la enseñanza y la investigación.

Esta investigación tiene como objetivo diagnosticar el estado actual del banco de pruebas de bombas centrífugas y ejecutar las intervenciones necesarias en sus sistemas eléctricos y de control, realizando una inspección detallada de los componentes eléctricos, mecánicos y de instrumentación con el fin de identificar las deficiencias y priorizar las acciones de reparación o reemplazo. Con base en este diagnóstico se diseñarán e implementarán mejoras orientadas a la funcionalidad, la seguridad y la facilidad de uso en actividades académicas relacionadas con control de procesos y automatización.

Durante la implementación del nuevo sistema de control se emplearán herramientas de automatización industrial, tales como Controladores Lógicos Programables (PLC), sensores de nivel y caudal, y dispositivos de protección y monitoreo. La incorporación de estos elementos permitirá mejorar la estabilidad del control, mejorar la regulación del nivel y del caudal de agua, y asegurar una operatividad confiable y replicable del banco de pruebas. Adicionalmente, se documentarán los procedimientos de operación y mantenimiento, así como las modificaciones realizadas, para facilitar su uso por parte del personal docente y estudiantes y prolongar la vida útil del equipo.

## Capítulo 1. Planteamiento del Problema

### 1.1. Planteamiento del Problema

La ingeniería juega un papel decisivo en la transformación tecnológica y en el desarrollo sostenible de múltiples sectores productivos y sociales. Su influencia abarca desde la automatización industrial y la mejora de redes eléctricas hasta la creación de sistemas inteligentes basados en inteligencia artificial, digitalización y robótica; avances que no solo incrementan la eficiencia y la productividad, sino que reconfiguran modelos de negocio, procesos educativos y prácticas profesionales. En este contexto dinámico, la ingeniería se encuentra en permanente evolución, lo que exige la formación de profesionales capaces de comprender y conducir cambios tecnológicos complejos, además de anticipar riesgos y oportunidades asociados a la implementación de nuevas tecnologías [1].

Para alcanzar este propósito es imprescindible promover enfoques pedagógicos centrados en el aprendizaje significativo que integren de forma coherente teoría y práctica. Los entornos educativos deben incluir laboratorios físicos y virtuales, bancos de pruebas, simuladores, proyectos interdisciplinarios y espacios de construcción aplicada donde los estudiantes diseñen, prueben y validen soluciones reales. Estas experiencias permiten desarrollar competencias técnicas como programación, control automático, instrumentación y diseño de sistemas, así como competencias transversales como trabajo en equipo, comunicación, pensamiento crítico y gestión de proyectos, indispensables en la era de la Industria 4.0 y la economía digital [1], [27]-[29].

La formación de ingenieros modernos debe incorporar la enseñanza de metodologías ágiles, el manejo de herramientas de simulación y conceptos de "digital twin", la comprensión de arquitecturas de datos y ciberseguridad, y la capacidad para trabajar con tecnologías emergentes como el aprendizaje automático y la robótica colaborativa. Es igualmente relevante integrar principios de sostenibilidad, ética profesional y normativas vigentes para que las soluciones técnicas contribuyan a un desarrollo responsable y con impacto social positivo. La articulación con la industria mediante prácticas, proyectos conjuntos y alianzas estratégicas facilita la

---

<sup>1</sup> Para garantizar la pertinencia y resiliencia del perfil profesional, las instituciones educativas deben fomentar la formación continua, la movilidad académica y el acceso a recursos abiertos y comunidades técnicas. Crear un ecosistema formativo que combine infraestructura adecuada, docentes capacitados, metodologías activas y vinculación con el sector productivo es la vía más efectiva para formar ingenieros preparados para liderar la innovación tecnológica y afrontar los retos socioeconómicos del futuro [1], [2].

transferencia de conocimiento y la actualización curricular frente a demandas laborales cambiantes.

Dentro del campo de la ingeniería electrónica, áreas como la automatización y el control de procesos requieren de entornos experimentales adecuados, para reforzar su enseñanza teórica. por lo tanto, los estudiantes deben contar con acceso a herramientas que les permitan una interacción real con los sistemas y enfrentar situaciones problemáticas similares a las que encontrarán en la industria. Sin embargo, muchas veces los laboratorios presentan limitaciones que dificultan este aprendizaje [1].

El programa de Ingeniería Electrónica de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca posee un laboratorio de control de procesos del cual hacen parte el banco de pruebas de bombas centrífugas; este fue diseñado para la enseñanza de automatización. No obstante, el paso del tiempo ha influido en un deterioro de estos equipos, afectando negativamente su operatividad y reduciendo su utilidad en las prácticas académicas.

La presente investigación tiene como finalidad principal evaluar las condiciones actuales del banco de pruebas, esto para realizar las mejoras necesarias en su sistema eléctrico y de control. Además, se elaborarán una serie de guías de laboratorio que promuevan la integración efectiva en la enseñanza y sirvan como una herramienta funcional para fortalecer la formación en control de procesos y automatización.

## **1.2. Problemática Identificada**

La Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca cuenta con un laboratorio de control dotado de varios bancos de prueba diseñados para la enseñanza de control de procesos. Entre estos equipos se encuentra el banco de pruebas de bombas centrífugas, empleado de forma habitual para el estudio de sistemas de fluidos. Sin embargo, su uso continuo y el paso del tiempo han provocado un notable deterioro: la estructura presenta desgaste y daño en componentes mecánicos, se han detectado fallas en las conexiones eléctricas y existe ausencia de un etiquetado y una identificación clara de los elementos. Estas deficiencias afectan directamente la operatividad y la precisión de las prácticas académicas e incrementan el riesgo para estudiantes y docentes que interactúan con el equipo [2], [30], [31].

La falta de programas de mantenimiento preventivo ha acelerado el desgaste de los elementos eléctricos y electrónicos, reduciendo la vida útil del banco de pruebas y limitando su empleo en actividades docentes y de investigación. Por tanto, es imprescindible realizar un

diagnóstico técnico exhaustivo que identifique las intervenciones necesarias, seguido de un plan de mejora que incluya la reparación o sustitución de piezas mecánicas, la normalización y protección de las conexiones eléctricas, la implementación de etiquetado conforme a buenas prácticas y la actualización del sistema de control cuando sea pertinente. Adicionalmente, se sugiere documentar los procedimientos de operación y mantenimiento, establecer rutinas periódicas de inspección y capacitar a docentes y estudiantes en el uso seguro del equipo para asegurar su disponibilidad y prolongar su vida útil en beneficio de la formación académica [27], [30], [31].

Ante este escenario, surge la necesidad de responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo impacta el rediseño del sistema de control y la implementación de protocolos de prueba en la precisión de las mediciones y el tiempo de respuesta del banco de pruebas de bombas centrífugas durante las prácticas de laboratorio?

### **1.3. Justificación**

La Facultad de Ingeniería, a través del laboratorio de control de procesos del programa de Ingeniería Electrónica, dispone de cuatro plantas experimentales orientadas a la enseñanza de automatización y control: nivel, temperatura, presión y bombas centrífugas. Estas estaciones fueron diseñadas para ofrecer experiencias prácticas integrales que permitan a los estudiantes comprender la instrumentación, el diseño de lazos de control, la adquisición de datos y la interacción con controladores lógicos programables. No obstante, en la actualidad solo dos de las cuatro plantas se encuentran operativas, lo que ha provocado impactos pedagógicos, logísticos y de seguridad que requieren atención prioritaria [3].

La indisponibilidad de la mitad de las estaciones produce un incremento significativo del número de estudiantes por estación de trabajo. Esta sobrecarga genera atascos en la programación de prácticas, reduce el tiempo efectivo que cada estudiante puede dedicar a las actividades experimentales y limita la posibilidad de que los alumnos realicen mediciones repetidas, ajustes y análisis críticos. Como consecuencia, se ve afectado el desarrollo de competencias prácticas esenciales, tales como la calibración de sensores, la puesta a punto de controladores PID, la programación de PLC y la interpretación de curvas características, habilidades que son fundamentales para la formación en automatización industrial [2], [3].

El problema tiene un impacto directo en los cursos que constituyen el énfasis en automatización industrial: Instrumentación Industrial, Software para Aplicaciones Industriales, PLC, Electiva HMI y Control de Procesos. En estos cursos, la experiencia práctica no solo refuerza contenidos teóricos, sino que también posibilita el aprendizaje basado en proyectos, la

validación experimental de diseños y la preparación para tareas profesionales reales. La carencia de condiciones de laboratorio adecuadas dificulta la evaluación formativa, limita la realización de proyectos de mayor complejidad y puede desembocar en brechas de competencia que afecten la empleabilidad y el desempeño profesional de los egresados.

Además de las consecuencias académicas, la situación incrementa riesgos operativos y acelera el desgaste de los equipos operativos debido a su uso intensivo. La concentración de estudiantes en menos estaciones aumenta la probabilidad de errores de manipulación y reduce las oportunidades para realizar mantenimiento preventivo. Desde un punto de vista institucional, la disminución en la disponibilidad y calidad de la infraestructura docente puede afectar la percepción de la calidad educativa, la capacidad de atraer alianzas con la industria y el cumplimiento de estándares académicos o de acreditación.

Para mitigar estos efectos y recuperar la funcionalidad completa del laboratorio es recomendable llevar a cabo, de manera prioritaria, un diagnóstico técnico integral que incluya evaluación mecánica, revisión de cableado y componentes eléctricos, verificación de instrumentación y estado de los sistemas de control. A partir del diagnóstico se deben definir acciones concretas: reparación o sustitución de piezas críticas, actualización de los sistemas de control y adquisición de repuestos, implementación de un programa de mantenimiento preventivo documentado y la estandarización del etiquetado de componentes y procedimientos de seguridad [3].

Complementariamente, mientras se ejecutan las intervenciones, pueden adoptarse medidas temporales que minimicen el impacto en la enseñanza, tales como la utilización de simuladores y entornos virtuales, la reestructuración de horarios para prácticas en grupos rotativos, la incorporación de asistentes docentes y la priorización de prácticas presenciales para contenidos que requieren laboratorio real<sup>2</sup>.

En base a lo anterior, se propone la presente investigación que busca generar acciones para mejorar las condiciones del banco de pruebas de bombas centrífugas y mejorar su

---

<sup>2</sup> Restablecer la operatividad de las cuatro plantas traerá beneficios tangibles para el programa: permitirá la restauración de condiciones óptimas de aprendizaje práctico, facilitará el desarrollo de proyectos interdisciplinarios, mejorará la preparación de los estudiantes frente a requerimientos laborales y favorecerá la vinculación con la industria para actividades de investigación y transferencia tecnológica. Un plan de intervención bien diseñado y acompañado de políticas de mantenimiento y formación docente garantizará la sostenibilidad del laboratorio y el cumplimiento de los objetivos formativos del énfasis en automatización industrial.

funcionamiento, de forma que se garantice su aplicabilidad en la formación académica de los estudiantes.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Rediseñar el sistema eléctrico y de control para la planta del banco de pruebas de bombas centrífugas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Elaborar el rediseño del sistema eléctrico de la planta conforme a las normativas del RETIE.
- Desarrollar sistemas de control convencional teniendo en cuenta los requerimientos de los cursos vinculados al uso de esta planta.
- Evaluar el funcionamiento de la planta bajo un protocolo de pruebas y guías de laboratorio.

## **1.5. Enfoque metodológico**

El enfoque metodológico adoptado en la presente investigación fue de corte cuantitativo. Según Ñaupas Paitán *et al.* [2], la investigación cuantitativa se caracteriza por la recolección de datos susceptibles de ser medidos y analizados estadísticamente, lo que posibilita la identificación de patrones, la cuantificación de problemas y la verificación de hipótesis o supuestos técnicos. En coherencia con esta definición, el estudio se orientó a obtener un diagnóstico objetivo y replicable del estado actual del banco de pruebas de bombas centrífugas mediante la recolección sistemática de información técnica, la realización de mediciones en campo y el análisis cuantitativo de los resultados.

El proceso metodológico se estructuró en fases claramente definidas. En la fase de levantamiento se ejecutaron inspecciones visuales y mediciones instrumentales sobre los componentes eléctricos, electrónicos y de instrumentación del banco de pruebas. Entre los parámetros evaluados estuvieron tensiones, corrientes, continuidad y aislamiento en el sistema eléctrico; respuesta y linealidad de sensores de nivel y caudal; y comportamiento operativo de la bomba bajo distintas condiciones de carga. Para ello se emplearon equipos de medición

calibrados, como multímetros, pinzas amperimétricas, megóhmetros, calibradores de presión y caudalímetros, así como registros automáticos de variables cuando el sistema lo permitió [3].

Los datos recopilados se organizaron en una base de datos estructurada y se sometieron a análisis estadístico. Se aplicaron estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación típica, percentiles) para caracterizar la distribución de las mediciones y detectar valores atípicos. Cuando fue pertinente se recurrió a pruebas inferenciales para comparar condiciones o grupos de mediciones, por ejemplo, pruebas t para comparar promedios entre estados del equipo o análisis de varianza para evaluar diferencias entre estaciones. Asimismo, se calcularon indicadores de confiabilidad y desempeño como tasas de fallo, disponibilidad operativa y variabilidad de señal de sensores.

Complementariamente, para enriquecer la validez del diagnóstico se realizó una triangulación metodológica que integró la información cuantitativa con una revisión documental de planos eléctricos, registros de mantenimiento y manuales de fabricante, y con el juicio de expertos mediante consultas a docentes y técnicos responsables del laboratorio. Esta combinación de fuentes facilitó la identificación de causas raíz y la corroboración de hallazgos instrumentales.

Se adoptaron procedimientos para garantizar la calidad de los datos y la seguridad durante la recolección: calibración previa de instrumentos, repetición de mediciones para estimar la precisión de los datos, registro estandarizado de protocolos de prueba y cumplimiento de normas de seguridad eléctrica. Asimismo, se documentó la trazabilidad de las mediciones para asegurar su reproducibilidad y permitir auditorías posteriores<sup>3</sup>.

De acuerdo con Ñaupas Paitán *et al* [2], una metodología estructurada permite garantizar la validez de los resultados a través del uso de técnicas estandarizadas de medición y análisis. Por esto, se estructuró la investigación en fases, cada una de ellas llevadas a cabo de manera secuencial, a fin de asegurar que las decisiones estén respaldadas por datos concretos y referencias técnicas.

---

<sup>3</sup> Los resultados del análisis cuantitativo fueron la base objetiva para el diseño de las mejoras propuestas en el sistema eléctrico y de control. Al cuantificar niveles de riesgo, criterios de criticidad y magnitudes de desviación respecto a parámetros aceptables, la investigación aportó un marco técnico sólido que soporta decisiones de ingeniería, priorización de recursos y la evaluación posterior de la efectividad de las intervenciones.

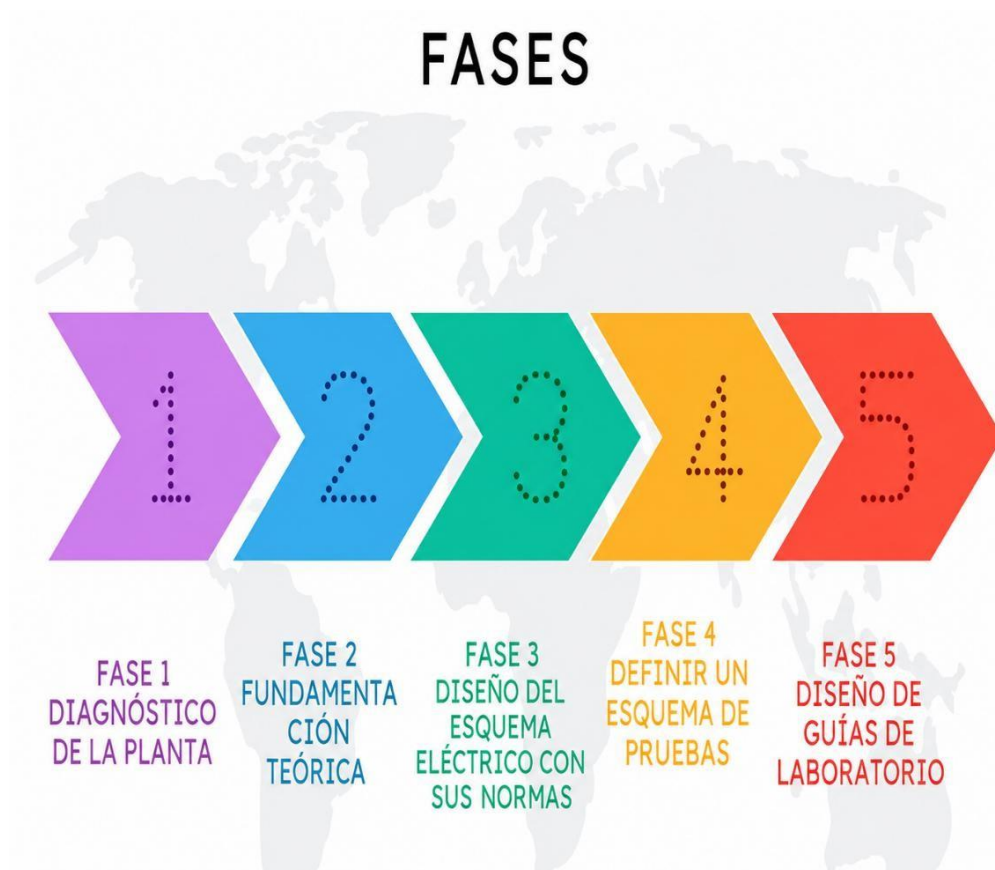


Fig. 1. Fases de la investigación.

Nota: Elaboración propia

## 1.6. Contribuciones del trabajo

El desarrollo de la presente investigación generó aportes técnicos, pedagógicos e institucionales significativos que impactan de manera directa la calidad de la formación en el laboratorio de control de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Estas contribuciones se dividen en tres ejes principales:

### 1.6.1. Contribución Técnica y de Infraestructura

Se logró la recuperación y puesta en marcha del banco de pruebas de nivel con bombas centrífugas, transformándolo de un sistema inoperativo, con fuentes improvisadas y cableado desorganizado, a una planta funcional, estructurada y segura. Este rediseño eléctrico se ejecutó tomando como lineamiento base el reglamento RETIE (implementando código de colores, protecciones mediante disyuntores y fuentes industriales reguladas). Aunque el proyecto no tiene fines de certificación oficial, estas mejoras técnicas disminuyen los tiempos de inactividad, facilitan la conexión de nuevos dispositivos y garantizan condiciones de seguridad robustas para los usuarios.

### **1.6.2. Contribución Pedagógica y Académica**

Mediante la integración de un PLC, una interfaz HMI y la implementación de técnicas de control (ON/OFF y PID), se creó un entorno estable para la experimentación. Adicionalmente, se diseñaron y validaron guías de laboratorio específicas probadas directamente con estudiantes. Esto proporciona a los docentes un recurso estructurado para asignaturas como Instrumentación o Control, facilitando a los futuros ingenieros electrónicos el desarrollo de competencias técnicas aplicables a su perfil profesional.

### **1.6.3. Contribución Institucional y Documental**

El proyecto entregó documentación técnica rigurosa e institucionalizó buenas prácticas de operación. Entre los insumos entregados destacan el diagrama P&ID elaborado bajo la norma ISA 5.1, los planos eléctricos actualizados y las configuraciones de software respaldadas. Esta base documental permite que el equipo de laboratorio pueda realizar mantenimientos preventivos y correctivos de manera autónoma, prolongando la vida útil de la planta.

## Capítulo 2. Fundamentación Teórica

### 2.1. La Automatización

La automatización de procesos, tanto en el ámbito industrial como en el académico, constituye un eje fundamental para el desarrollo de soluciones que garanticen mayor eficiencia, seguridad y competitividad. En ambos contextos, la implementación de sistemas de control resulta indispensable para lograr un manejo adecuado de variables críticas como el caudal, el nivel, la presión y la temperatura. El acelerado avance de la tecnología en las últimas décadas ha puesto en evidencia la necesidad de aplicar estrategias de control cada vez más sofisticadas y precisas, capaces de ofrecer estabilidad, confiabilidad y adaptabilidad a distintos entornos de operación [4]. De esta manera, la automatización se consolida no solo como una herramienta técnica, sino también como un pilar para la innovación y la formación de profesionales preparados para enfrentar los retos de la Industria 4.0.

La implementación de estos sistemas faculta a los operadores para la gestión, el monitoreo y la regulación de los procesos de forma remota. Esta capacidad no solo mitiga los riesgos laborales al reducir la exposición física del personal frente a la maquinaria, sino que aumenta la eficiencia operativa y agiliza la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. A través de plataformas tecnológicas avanzadas, es posible supervisar la condición de los activos, identificar anomalías y ejecutar estrategias correctivas que garantizan la disponibilidad y confiabilidad del sistema [5]. Entre las principales ventajas competitivas de esta integración destacan la supervisión continua y la detección temprana de fallas, factores clave para la gestión de activos y la reducción de costos operativos y de mantenimiento.

En este contexto, la ingeniería electrónica desempeña un rol transversal, pues se encarga del diseño, acondicionamiento y mejora del hardware que viabiliza la comunicación entre el nivel de campo —conformado por sensores y actuadores— y el nivel de supervisión. En el núcleo de esta arquitectura se encuentran los Controladores Lógicos Programables (PLC), dispositivos centrales en la automatización industrial capaces de ejecutar algoritmos de control, coordinar procesos y comunicarse con sistemas superiores. Su versatilidad, fiabilidad y facilidad de programación los convierten en una pieza clave tanto en la enseñanza como en la práctica profesional. La comprensión de su funcionamiento y su correcta integración con la instrumentación constituye una base sólida para el desarrollo de competencias prácticas en el control de procesos.

Esta revisión teórica presentada en este capítulo no solo aporta el marco conceptual necesario para respaldar el rediseño del banco de pruebas, sino que también subraya la importancia de las estrategias y herramientas tecnológicas que permiten llevar la teoría a la práctica. Esto permite cerrar la brecha existente entre el conocimiento académico impartido en las aulas y las necesidades reales del entorno industrial. Por ende, a lo largo de este apartado se exponen los fundamentos técnicos y normativos aplicados al proyecto, abarcando desde los estándares de seguridad eléctrica e instrumentación, hasta el análisis comparativo de técnicas de control fundamentales, como las estrategias ON/OFF y Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

## **2.2. Normatividad y Seguridad en el Diseño**

El diseño, rediseño y operación de equipos industriales y de laboratorio cuentan con un marco de referencia para el cumplimiento de normativas que proporcionen tanto la seguridad del usuario como la correcta interpretación técnica de los sistemas. En el contexto de este proyecto, se aplican o se tienen como marco de referencia las normativas específicas para la infraestructura eléctrica y estándares internacionales para la representación de instrumentos y lazos de control.

### **2.2.1. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)**

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) es el instrumento normativo principal en Colombia, emitido por el Ministerio de Minas y Energía, que establece las medidas necesarias para garantizar la seguridad de las personas [6].

La versión más reciente del RETIE, actualizada mediante la Resolución 40117 del 2 de abril de 2024, organiza sus disposiciones técnicas para regular no solo las instalaciones como un conjunto, sino también los productos, materiales y las competencias del personal involucrado. En el contexto de la modernización de bancos de pruebas y sistemas de automatización, la aplicación de este reglamento resulta imperativa para evitar fallas que puedan comprometer la operatividad del equipo, causar daños a los costosos dispositivos de control (como los PLC) y, de manera crítica, para garantizar la integridad física de los estudiantes y docentes durante las prácticas de laboratorio [6].

Para el diseño y adecuación de tableros de control industrial y accionamiento de motores (como las bombas centrífugas), el RETIE exige el cumplimiento de criterios técnicos específicos, entre los cuales destacan:

- **Tableros de Control y Envolventes:** El reglamento estipula que todo tablero eléctrico debe estar construido con materiales resistentes al fuego, a la corrosión y poseer una rigidez mecánica adecuada. Además, exige una separación física y lógica entre los circuitos de potencia (alimentación de bombas a 110V/220V AC) y los circuitos de control o instrumentación (señales de 24V DC o 4-20mA). Los tableros deben contar con un grado de protección (IP) pertinente para su entorno operativo, lo cual es crítico en laboratorios de fluidos donde existe riesgo de salpicaduras.
- **Sistemas de Protección Eléctrica:** Es mandatoria la instalación de dispositivos de corte y protección contra sobrecorrientes y cortocircuitos. Para ello, se requiere el uso de disyuntores termomagnéticos dimensionados de acuerdo con la carga de los equipos. El componente térmico protege el cableado y los motores frente a sobrecargas, mientras que el componente magnético actúa de forma instantánea ante cortocircuitos. La norma dicta que estas protecciones deben estar segmentadas, permitiendo aislar fallas individuales sin dejar fuera de servicio la totalidad de la planta.
- **Código de Colores y Organización del Cableado:** Para garantizar un mantenimiento seguro y la rápida identificación de los circuitos, el RETIE impone un código de colores estandarizado. Por ejemplo, exige el uso de conductores con aislamiento color verde o verde con franjas amarillas de forma exclusiva para la tierra física, color blanco para el neutro, y colores específicos (como amarillo, azul, rojo o negro) para las fases, dependiendo del nivel de tensión. Asimismo, demanda que las conexiones se realicen de forma ordenada utilizando borneras industriales, canaletas y terminales debidamente ajustados, evitando empalmes defectuosos que generen puntos calientes.
- **Sistemas de Puesta a Tierra:** En entornos donde convergen agua y electricidad, el reglamento es categórico respecto a la equipotencialidad. Todas las partes metálicas expuestas que no transporten corriente en condiciones normales, por ejemplo: carcasas de las bombas, estructuras de los tableros; deben estar sólidamente conectadas al sistema de puesta a tierra. Esto garantiza que, en caso de una falla de aislamiento, la corriente de fuga se derive a tierra y active las protecciones, previniendo choques eléctricos fatales.
- **Señalización y Etiquetado:** Finalmente, se exige la marcación clara de los tableros mediante señales de advertencia de riesgo eléctrico. Del mismo modo, todos los componentes internos (contactores, relés, fuentes, disyuntores y borneras) deben estar

identificados con etiquetas que coincidan de manera exacta con los planos eléctricos y diagramas de conexión elaborados bajo las normativas correspondientes (como la norma ISA).

La integración estricta de estos lineamientos normativos durante el rediseño de equipos didácticos no solo eleva el estándar técnico de la infraestructura universitaria, sino que inculca en los futuros ingenieros la cultura del cumplimiento normativo y las buenas prácticas desde las etapas tempranas de su formación profesional.

### **2.2.2. Normatividad de la Sociedad Internacional de Automatización (ISA)**

Para asegurar la coherencia en la instalación, el diagnóstico de fallas y las futuras labores de mantenimiento preventivo y correctivo, es indispensable respaldar la implementación física con documentación técnica estandarizada. Por esta razón, la Sociedad Internacional de Automatización (ISA, por sus siglas en inglés) tiene como función establecer los estándares clave para la instrumentación y el control de procesos industriales. Su objetivo principal es promover la eficiencia, la seguridad, la interoperabilidad y la compatibilidad en los entornos de automatización a nivel global.

La estandarización documental es crítica en proyectos de ingeniería, ya que elimina ambigüedades en la interpretación de los sistemas, facilita el entrenamiento de operadores y reduce significativamente los tiempos muertos (Downtime) durante paradas de planta o fallos imprevistos. En el contexto de un banco de pruebas académico, la aplicación de estas normas no solo organiza el cableado y la lógica de control, sino que constituye una herramienta pedagógica inmersiva que prepara a los estudiantes para interactuar con planos reales del sector productivo.

Dicha sociedad ha establecido diversas normas de aplicación industrial, entre las cuales destacan:

#### **Norma ISA-5.1 (Simbología e Identificación de Instrumentación)**

Es la norma rectora para la elaboración de diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID - Piping and Instrumentation Diagrams). Establece un sistema uniforme de designación, símbolos gráficos y códigos alfanuméricos (conocidos como Tags) para identificar instrumentos, sistemas de control, válvulas, actuadores y elementos primarios de medición (como sensores de nivel o caudal) [7].

Dicta cómo representar el flujo de señales (eléctricas, neumáticas, de software o enlaces de comunicación) y la ubicación física de los dispositivos (montados en campo, en el panel de control principal o auxiliares).

Su aplicación permite el uso de un lenguaje gráfico único y universal en el diseño de procesos industriales, garantizando que cualquier ingeniero o técnico, independientemente de su especialidad o idioma, pueda interpretar correctamente el diagrama de control del banco de bombas centrífugas.

### **2.3. Arquitectura del Sistema de Control**

En el campo de la ingeniería electrónica y la automatización, la arquitectura de un sistema de control se define como la estructura jerárquica, física y lógica que integra sensores, controladores, actuadores y redes de comunicación. Su propósito es actuar de manera coordinada para regular, supervisar y modificar el comportamiento de un proceso industrial, garantizando su estabilidad frente a perturbaciones externas y optimizando el consumo de recursos. El núcleo operativo y de procesamiento de esta arquitectura recae, casi en su totalidad, en los controladores industriales [8].

#### **2.3.1. Controladores Lógicos Programables (PLC)**

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) constituyen el cerebro de la automatización industrial moderna. Se definen como dispositivos electrónicos digitales robustos, diseñados específicamente para operar en entornos industriales hostiles (soportando vibraciones, altas temperaturas, humedad e interferencias electromagnéticas) y controlar procesos dinámicos en tiempo real [9].

Su función primordial es adquirir las señales provenientes del nivel de campo (sensores de nivel, sensores de flujo volumétrico, presostatos), procesar dicha información basándose en una lógica determinista previamente programada, y generar las señales de salida necesarias para comandar los elementos finales de control (bombas centrífugas, electroválvulas, servoválvulas, contactores). A diferencia de la lógica cableada tradicional basada en relés, los PLC ofrecen una fiabilidad operativa, ya que permiten modificar la secuencia de control únicamente alterando el software, sin necesidad de recablear el sistema.

Para comprender su capacidad de operación, es fundamental analizar su estructura interna (véase la Fig. 2), la cual se compone de los siguientes módulos esenciales:

### 2.3.1.1. Unidad Central de Procesamiento (CPU).

Es el microprocesador encargado de ejecutar el programa de usuario de forma cíclica (scan cycle). Lee el estado de las entradas, ejecuta las instrucciones lógicas o matemáticas (como el algoritmo PID) y actualiza el estado de las salidas.

### 2.3.1.2. Módulos de Entradas.

Actúan como la interfaz de adquisición de datos. Aíslan galvánicamente al procesador y convierten las magnitudes físicas del proceso, ya sean digitales (ON/OFF) o analógicas (voltajes de 0-10V o corrientes de 4-20mA), en señales lógicas que la CPU puede interpretar.

### 2.3.1.3. Módulos de Salidas.

Realizan la función inversa. Transforman las decisiones lógicas de la CPU en señales eléctricas de potencia (frecuentemente 24V DC o relés aislados) capaces de accionar los actuadores físicos.

### 2.3.1.4. Fuente de Alimentación y Comunicaciones.

Proveen la energía regulada necesaria para el funcionamiento de los circuitos internos y alojan los puertos de red (como Ethernet/Modbus TCP) para enlazarse con interfaces de usuario (HMI) u otros controladores.

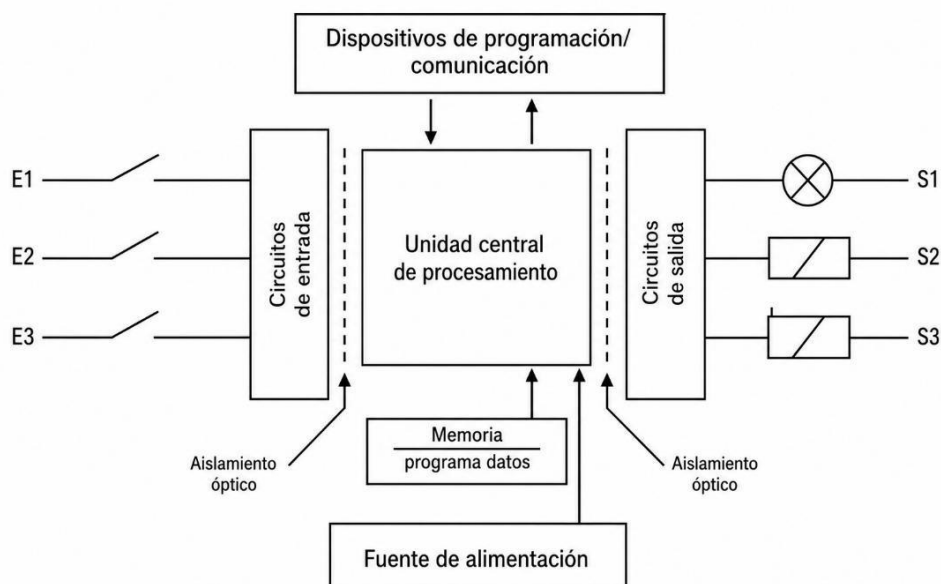


Fig. 2. Arquitectura de un Controlador Lógico Programable (PLC)

Fuente: adaptado de [10].

En el ámbito de la formación académica en ingeniería, la integración de PLC de arquitectura modular, como el Schneider Modicon M340, resulta de vital importancia. Estos equipos no solo poseen la capacidad de gestionar procesos continuos y discretos con alta precisión, sino que permiten a los estudiantes interactuar con lenguajes de programación estandarizados bajo la norma internacional IEC 61131-3 (como el Diagrama de Bloques de Función o lenguaje Ladder, utilizados en el entorno Unity Pro S / EcoStruxure).

Actualmente, la evolución tecnológica ha impulsado a estos dispositivos hacia su convergencia con el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y el procesamiento de datos en el borde (Edge Computing). De este modo, los PLC trascienden su función clásica de ejecución de rutinas aisladas para convertirse en nodos inteligentes esenciales dentro de la arquitectura de la Industria 4.0, facilitando la extracción de datos, la sintonización de lazos de control y la auto-optimización de los procesos con una mínima intervención humana [11].

### **2.3.2. Sistemas de Supervisión (HMI y SCADA)**

En el nivel superior de la arquitectura de automatización se encuentran las plataformas informáticas dedicadas a la visualización, el monitoreo y el comando de los procesos industriales. Mientras que los controladores ejecutan la lógica de control a alta velocidad en el nivel de campo, los sistemas de supervisión traducen los datos crudos del procesador en información gráfica comprensible para los operadores humanos. Dentro de este ámbito, es fundamental distinguir entre los sistemas SCADA y las interfaces HMI.

Por un lado, los sistemas **SCADA** (Supervisory Control And Data Acquisition) están diseñados para la supervisión y adquisición de datos a gran escala, gestionando múltiples procesos distribuidos geográficamente. Su núcleo centraliza la recopilación automática de información histórica, la gestión de bases de datos relacionales y la interconexión con redes empresariales [12]. Por otro lado, la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) actúa como el punto de interacción directo y local entre el operador y una máquina o proceso específico [13]. En el contexto de bancos de pruebas y plantas piloto de laboratorio, el enfoque principal recae sobre el diseño y uso de pantallas HMI.

La función principal de una HMI es facilitar la supervisión centralizada y el ajuste de los procesos sin necesidad de contacto físico directo con la instrumentación eléctrica o mecánica, lo cual incrementa notablemente la seguridad del usuario y agiliza la toma de decisiones. Estos sistemas proporcionan una visualización en tiempo real de variables críticas —tales como el

nivel, el caudal y el estado de las bombas— mediante representaciones gráficas dinámicas, a menudo basadas en la simbología de las normativas ISA. Asimismo, integran gestores de alarmas que alertan de manera instantánea ante cualquier anomalía o desviación operativa frente a los valores de referencia esperados [13].

En el ámbito de la formación académica en ingeniería electrónica, la HMI constituye una herramienta pedagógica y operativa indispensable, ya que, a través de ella, los estudiantes logran interactuar con el sistema de control subyacente de manera intuitiva. Es en esta interfaz donde se ingresan los valores de consigna (SetPoint), se modifican las constantes de sintonización de los controladores (Proporcional, Integral y Derivativo) y se alternan los modos de operación (automático o manual). Aún más importante, las HMI modernas permiten la graficación de tendencias en tiempo real, lo que resulta vital para analizar la respuesta dinámica del sistema, evaluar el sobreimpulso, observar los tiempos de establecimiento y comparar visualmente el desempeño de un control continuo frente a un control discreto tipo ON/OFF.

En cuanto a su implementación física y tecnológica, existen diversas tipologías que abarcan desde paneles táctiles industriales ubicados a pie de máquina, hasta sistemas avanzados basados en PC industrial (IPC) comunicados vía Ethernet con los Controladores Lógicos Programables. Adicionalmente, tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial (IA) y la Realidad Aumentada (AR) están redefiniendo estas interfaces, facilitando el diagnóstico predictivo de fallos. En este sentido, estudios recientes, como [19], analizan el impacto de las HMI en la evolución de la interacción humano-máquina, destacando su rol fundamental en la convergencia hacia la digitalización total de la Industria 4.0 y la Sociedad 5.0.

## **2.4. Sistemas y Técnicas de Control**

Los sistemas de control constituyen un componente fundamental en la regulación procesos dentro del ámbito de la ingeniería electrónica, dado que permiten supervisar y ajustar de manera continua el comportamiento de un sistema con el fin de garantizar su correcto funcionamiento [14]. Estos sistemas pueden aplicarse en múltiples áreas, entre ellas la automatización industrial, la gestión de la energía, las telecomunicaciones, la robótica y el control de dispositivos electrónicos, proporcionando a cada una de estas disciplinas un mayor grado de estabilidad, eficiencia y seguridad en sus operaciones [3].

Una de las estrategias de control más utilizadas es el control Proporcional, Integral y Derivativo (PID), reconocido por su versatilidad y eficacia en la regulación de variables de proceso tales como la temperatura, la presión, el nivel, el caudal y la velocidad. El ajuste

adecuado de los parámetros del control PID permite mantener los sistemas en condiciones estables, minimizando las oscilaciones, reduciendo los tiempos de respuesta y corrigiendo los errores que puedan surgir durante la operación. Gracias a estas características, el control PID se ha convertido en un estándar en la industria y en un punto de partida esencial en la formación académica de ingenieros que buscan comprender y aplicar técnicas de automatización. La importancia de estos sistemas trasciende el ámbito estrictamente técnico, ya que su aplicación incide directamente en la calidad y confiabilidad de los productos y servicios. En la ingeniería electrónica, el diseño de dispositivos que requieren altos niveles de aproximación a lo real depende en gran medida de la correcta implementación de estrategias de control que aseguren la estabilidad frente a perturbaciones externas y la eficiencia en el consumo de recursos. En este sentido, los sistemas de control no solo son herramientas tecnológicas, sino también elementos estratégicos que impulsan la innovación, la competitividad y la sostenibilidad en los distintos sectores donde se aplican [3].

#### **2.4.1. *Sistemas de control de lazo abierto***

En los sistemas de control en lazo abierto, la señal de control es generada sin utilizar la información de la salida para modificar la acción de control, es decir, no existe un mecanismo de retroalimentación que compare el valor obtenido con una referencia establecida. Este tipo de sistemas se emplea cuando la relación entre la entrada y la salida es completamente conocida y las perturbaciones externas tienen un efecto reducido o predecible sobre el proceso. Al no contar con retroalimentación, su desempeño depende principalmente de la correcta calibración inicial y de la estimación de los parámetros del sistema, lo que puede dar lugar a errores ante cambios no previstos en las condiciones de operación normales. Aunque presentan ventajas de implementación y bajo costo, los sistemas de lazo abierto resultan inadecuados en procesos que requieren corrección del error o alta robustez frente a perturbaciones. Por esta razón, en aplicaciones industriales donde se demanda mayor exactitud y capacidad de corrección, se prefiere el uso de sistemas de control en lazo cerrado, los cuales incorporan realimentación para ajustar la señal de control en función del comportamiento de la salida [4]. La Fig. 3 presenta la estructura general de un sistema de control de lazo abierto.

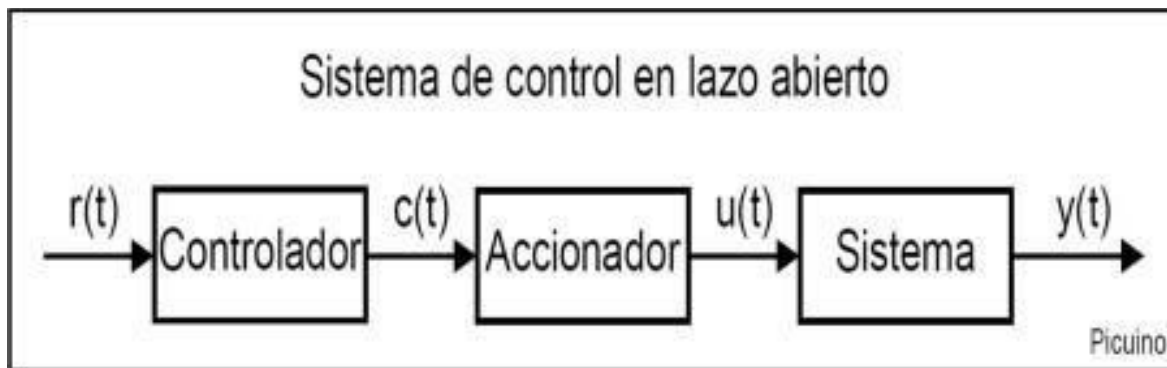


Fig. 3. Sistema de control de Lazo abierto.

Fuente: [15].

#### 2.4.2. *Sistemas de control de lazo cerrado*

Estos sistemas utilizan realimentación para ajustar su respuesta, a fin de que la salida del sistema sea continuamente comparada con un valor de referencia. En caso de que el sistema detecte una desviación (error), se encarga de realizar los ajustes automáticos en su funcionamiento para corregirlo y mantener la salida esperada. Los sistemas de lazo cerrado se utilizan ampliamente en sectores industriales, de robótica y automatización de procesos [15]. La Fig. 4 ilustra el esquema básico de realimentación empleado en un sistema de control de lazo cerrado.

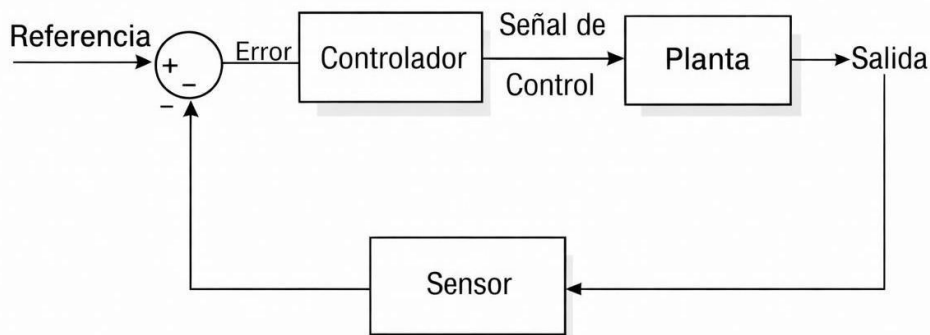


Fig. 4. Diagrama de Sistema de Control en lazo cerrado.

A continuación, se describen las técnicas más utilizadas que se realizan en este tipo de sistemas.

### 2.4.2.1. Control ON/OFF

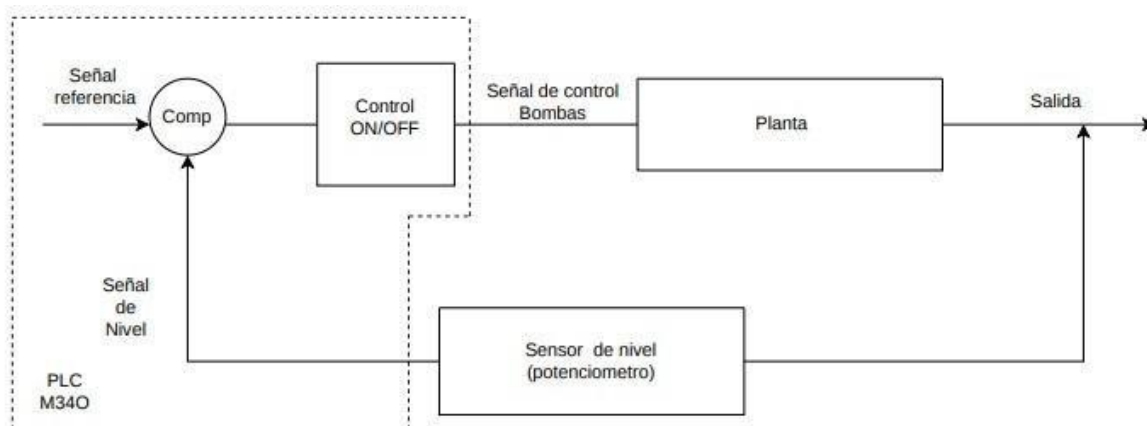


Fig. 5. Control ON/OFF

Se emplea ampliamente en sistemas de control debido a su robustez y confiabilidad operativa. Su aplicación es preferible en sistemas dinámicos simples que no requieren grandes aproximaciones matemáticas [16]. El funcionamiento de este controlador consiste en una lógica doble que se alterna entre dos estados: uno de encendido y otro de apagado, esto como respuesta a la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida del sistema.

El controlador ON/OFF funciona comparando el error obtenido entre el valor de referencia (*set point*) y la salida del sistema. Cuando el error es positivo —es decir, cuando la salida se encuentra por debajo del valor de referencia— el controlador conmuta al estado activo. En caso contrario, cambia al estado inactivo. La acción específica depende de la configuración del actuador, que puede ser normalmente abierto o normalmente cerrado. Contrario a lo anterior, si es la salida la que supera al valor de referencia, el controlador da la orden y se apaga. El proceso que realiza es repetitivo y continuo para mantener el sistema dentro de un rango aceptable de funcionamiento. El control ON/OFF se caracteriza por su simplicidad, puesto que no requiere de cálculos complejos ni de un modelo matemático que detalle el sistema, esto permite una rápida implementación.

Dentro de las principales aplicaciones de este controlador se encuentran la regulación de temperatura en los sistemas de calefacción y refrigeración, control de iluminación, operación de motores en bombas o ventiladores, y gestión de válvulas en sistemas de riego y control de flujo. También es común utilizarlo en los sistemas de seguridad, como alarmas y controles de acceso.

No obstante, a pesar de sus múltiples aplicaciones, el control ON/OFF no es recomendable en aquellos sistemas que requieran un control con mayor aproximación matemática o que presenten una dinámica compleja [16].

#### 2.4.2.2. Control PID

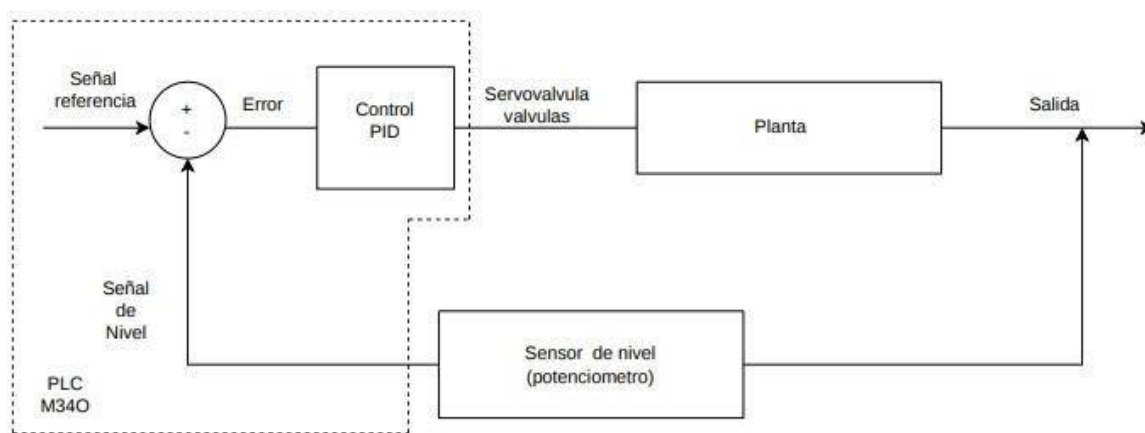


Fig. 6. Control PID.

El controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID) constituye uno de los mecanismos más utilizados en el ámbito de la automatización y el control de procesos, debido a su eficacia y simplicidad en la implementación. Su funcionamiento se basa en la comparación constante entre la señal de salida real del sistema y el valor de referencia previamente establecido, lo que permite detectar de manera continua la diferencia o error existente entre ambas magnitudes [17].

Este error es procesado a través de tres acciones de control: la proporcional, que responde de forma inmediata a la magnitud del error; la integral, que acumula las desviaciones en el tiempo para eliminarlas de manera permanente; y la derivativa, que anticipa el comportamiento futuro del sistema corrigiendo posibles variaciones bruscas. La combinación de estas tres acciones genera una señal correctiva capaz de ajustar la operación del sistema en tiempo real, reduciendo desviaciones, mejorando la estabilidad y aumentando la aproximación a lo real del proceso [18].

Una de las principales fortalezas del controlador PID es su capacidad de adaptación a diferentes entornos y condiciones de operación. Gracias a ello, puede aplicarse en una amplia gama de procesos industriales y académicos que requieren aproximación matemática, confiabilidad y eficiencia. Se encuentra presente en sistemas de regulación de temperatura en hornos industriales, en el control de velocidad de motores eléctricos, en el manejo de presión y

caudal de fluidos en plantas de procesamiento e incluso en aplicaciones avanzadas de robótica y aeronáutica, donde la estabilidad y el control exacto resultan indispensables [17].

Además, el PID se ha consolidado como una herramienta pedagógica esencial en la formación de ingenieros, ya que proporciona una base práctica y conceptual para comprender los principios fundamentales del control automático. Su estudio permite desarrollar competencias en ajuste de parámetros, análisis dinámico de sistemas, habilidades que son altamente valoradas en el campo profesional. Por estas razones, el controlador PID no solo es un recurso técnico, sino también un elemento clave en el fortalecimiento del aprendizaje y en el desarrollo de soluciones innovadoras en el ámbito del control de procesos [18].

En conjunto, estas acciones permiten que el controlador PID combine respuesta inmediata, corrección del error acumulado y anticipación de variaciones, por lo que puede adaptarse a diferentes dinámicas de proceso sin requerir una estructura de control excesivamente compleja [17], [18].

Matemáticamente, el comportamiento del controlador PID puede describirse mediante la ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Fig. 7. Fórmula matemática del PID.

Fuente: [19].

Donde  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  son las constantes de ganancia correspondientes a las acciones proporcional, integral y derivativa, respectivamente, mientras que  $e(t)$  representa el error, definido como la diferencia entre el valor deseado y la salida actual del sistema. La señal de control  $u(t)$  es el resultado de la suma ponderada de estas tres contribuciones, cada una de las cuales desempeña un papel específico dentro del controlador. La acción proporcional ( $K_p e(t)$ )

proporciona una respuesta inmediata al error, aplicando una corrección proporcional a su magnitud [17].

Esta acción es particularmente útil en procesos que requieren precisión a largo plazo, ya que asegura que el sistema alcance exactamente el valor deseado. Sin embargo, un exceso en el ajuste de  $K_i$  puede generar oscilaciones y comprometer la estabilidad.

Es por eso que se utilizan metodologías que calculan o estiman los parámetros del controlador. Con el fin de determinar los valores adecuados para estas constantes, la literatura ofrece metodologías tales como: Ziegler-Nichols, Cohen-Coon y el método de ensayo y error.

## **2.5. Métodos de sintonización del control PID**

### **2.5.1. Método Ziegler y Nichols**

Esta técnica utiliza aproximaciones empíricas o simulaciones para ajustar los parámetros según los requerimientos del sistema [20].

El primer procedimiento de sintonización basado en una prueba de lazo cerrado fue propuesto por Ziegler y Nichols, quienes presentaron ambos procedimientos en la misma publicación. Utilizando un controlador puramente proporcional y mediante un proceso iterativo, el procedimiento requiere aumentar paulatinamente la ganancia del mismo hasta lograr que el sistema entre en una oscilación sostenida ante un cambio del escalón en el valor deseado. La ganancia en este punto es la ganancia última  $K_{cu}$  y el periodo de la oscilación, el periodo último  $T_u$ . Para el ajuste proporcional seleccionaron, como se indicó, el decaimiento de 1/4 como un compromiso entre el error permanente y el decaimiento, y encontraron que la ganancia proporcional para un controlador P debería ser la mitad de la ganancia última.

Sin embargo, en su desarrollo original, Ziegler y Nichols realizaron implementaciones en sistemas donde la mayoría eran procesos autorreguladores, es decir, el sistema alcanza por sí mismo un nuevo estado estacionario finito, sin necesidad de acción de control integral.

### **2.5.2. Método de Cohen-Coon**

Como alternativa para superar las limitaciones anteriores, surge el método de Cohen-Coon, los cuales introdujeron un índice de autorregulación definido como  $u = t_m/\tau$ , planteando nuevas ecuaciones de sintonización. Este método es preferible en procesos que presentan retardos significativos (tiempo muerto), ya que sus fórmulas matemáticas compensan de manera más efectiva la demora entre la acción de control y la respuesta de la variable. Se basa en

obtener el mejor modelo de primer orden más tiempo muerto, funcionando bajo un criterio de desempeño de decaimiento de  $1/4$  con sobrepaso mínimo y buscando la mínima área bajo la curva de respuesta.

### **2.5.3. Método de ensayo y error**

Por último, esta técnica permite el ajuste de los controladores PID en aquellos sistemas que no poseen un modelo matemático a detalle. El método consiste en modificar progresivamente los parámetros proporcionales ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativo ( $K_d$ ), observando la respuesta que da el sistema y corrigiendo en cada iteración hasta lograr una estabilidad adecuada. El proceso da inicio al momento que se ajusta el  $K_p$ , esto se realiza comenzando con un valor bajo y se va incrementando de forma gradual hasta que se obtenga una respuesta estable sin oscilaciones excesivas. Luego, se incluye  $K_i$  con el fin de ir corrigiendo errores de tipo estacionarios, lo cual asegura que su valor no produzca inestabilidad en el controlador. Para finalizar,  $K_d$  se ajusta para suavizar la respuesta y reducir el sobre impulso.

El método de ensayo y error es ampliamente utilizado en entornos industriales porque es simple y adaptable a distintos procesos. Sin embargo, puede requerir varias iteraciones y un conocimiento a detalle del sistema que eviten ajustes que lleven a escenarios inestables. Existen investigaciones recientes que han explorado alternativas más automatizadas para utilizar en la sintonización de controladores PID.

Por ejemplo, en su investigación Peñaloza-Mendoza et al. [19] formulan un modelo basado en aprendizaje por refuerzo para la mejora automática de estos parámetros. Estos enfoques buscan fortalecer el proceso al mejorar la precisión del ajuste. En el presente estudio, se utilizará el método de ensayo y error para sintonizar el controlador PID del sistema a analizar, permitiendo realizar ajustes experimentales y evaluar su impacto en el desempeño del proceso [21].

Para el desarrollo del presente estudio, se ha seleccionado el método de ensayo y error para la sintonización del controlador PID. Esta decisión se justifica en la naturaleza experimental del sistema a analizar, el cual no cuenta con un modelo matemático previo lo suficientemente detallado para aplicar de forma adecuada métodos analíticos como Ziegler-Nichols o Cohen-Coon.

### **Capítulo 3. Implementación**

El laboratorio de control de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca dispone de un banco de pruebas de bombas centrífugas que constituye un recurso fundamental para la enseñanza de la automatización y la instrumentación. Sin embargo, a lo largo del tiempo este equipo ha presentado una serie de problemáticas de carácter mecánico, eléctrico y de accionamiento, las cuales han repercutido de manera directa en su funcionalidad y han limitado su aprovechamiento en el ámbito académico. Estas deficiencias no solo afectan el desarrollo adecuado de las prácticas de laboratorio, sino que también representan un obstáculo para que los estudiantes consoliden sus competencias técnicas en condiciones similares a las exigidas en el entorno industrial.

Con el propósito de superar dichas limitaciones, se planteó un conjunto de estrategias orientadas a garantizar la recuperación integral del banco de pruebas. Entre estas acciones destaca el rediseño del sistema eléctrico, ejecutado bajo los lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Por otra parte, se llevó a cabo una mejora en la instrumentación para incrementar la confiabilidad de las mediciones de variables como nivel y flujo. En lugar de plantear un sistema de control automático complejo, se optó por una solución práctica y funcional mediante la incorporación de un potenciómetro. Este componente permite una regulación manual, análoga y variable de la velocidad o capacidad de las bombas, otorgando a los estudiantes la posibilidad de modificar los puntos de operación del sistema de manera estable y observar el comportamiento de las variables en distintos regímenes de trabajo. Asimismo, se optimizó el sistema de accionamiento de las bombas. Estas soluciones fueron concebidas bajo criterios de eficiencia, seguridad y pertinencia académica.

El presente capítulo detalla cada una de estas propuestas de mejora, describiendo el proceso de diagnóstico, diseño e implementación llevado a cabo. Asimismo, se explica la forma en que dichas acciones contribuyeron a restaurar la operatividad del banco de pruebas. De esta manera, se garantiza que el equipo continúe siendo un recurso pedagógico eficaz, capaz de integrar la teoría con la práctica en el estudio de los procesos industriales.

#### **3.1. Implementación del Sistema Eléctrico**

##### **3.1.1. Diagnóstico de la problemática**

Mediante el diagnóstico realizado, fue posible identificar una serie de dificultades que comprometían de manera significativa la operatividad y la seguridad del banco de pruebas. A

partir de una revisión técnica y documental detallada, se evidenció que una de las deficiencias más críticas correspondía al sistema eléctrico. Entre estas fallencias se destacaron: la ausencia de protecciones termo-magnéticas adecuadas, lo que aumentaba el riesgo de fallas por cortocircuitos o sobrecargas; la desorganización general en el cableado, que dificultaba cualquier labor de mantenimiento; la carencia de un sistema de etiquetado (infringiendo las normativas básicas de identificación), lo que generaba confusión en la traza de conexiones; y la presencia de un panel de mando fabricado con materiales poco robustos, reduciendo la vida útil del tablero.

De igual manera, se identificaron limitaciones relevantes en la instrumentación y en la capacidad de manipulación del sistema. Por un lado, se utilizaban sensores de muy poca precisión que no garantizaban lecturas confiables de variables críticas como el nivel, la presión y el caudal. Por otro lado, el banco carecía de un mecanismo de regulación variable para el accionamiento de las bombas. Al operar de manera estática (únicamente en estados de encendido y apagado), se restringía drásticamente el alcance de las prácticas, impidiendo a los estudiantes interactuar con el sistema para modificar variables en tiempo real y analizar respuestas dinámicas.

Finalmente, el diagnóstico permitió evidenciar problemas de tipo físico y documental que afectaban la sostenibilidad del proyecto. Entre ellos se encontraba el deterioro físico de las bombas centrífugas, cuya condición mecánica comprometía el funcionamiento general del sistema hidráulico. A esto se sumaba la falta de documentación técnica y manuales de operación accesibles, lo cual dificultaba el desarrollo autónomo de las prácticas por parte de los estudiantes y limitaba significativamente el proceso de enseñanza-aprendizaje.

### **3.1.2. Estrategia de solución y aplicación normativa**

Para corregir estas deficiencias, se ejecutó un rediseño eléctrico integral. Se reemplazó el panel de madera por una estructura en acrílico y se sustituyeron las fuentes genéricas por una fuente regulada industrial.

Conforme a los lineamientos generales de la normativa RETIE (abordada teóricamente en el Capítulo 2), se aplicaron los siguientes criterios específicos en la adecuación de la planta:

**Protecciones:** Se instalaron disyuntores termomagnéticos segmentados para la protección individual de cada bomba y un interruptor general que permite el corte total de energía del sistema en caso de emergencia.

Código de colores y cableado: Se organizó el cableado en borneras industriales, respetando el código de colores estandarizado para la fácil identificación de fase, neutro y tierra.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo que resume los cambios realizados en el sistema:

Tabla I.

*Especificaciones de los componentes del panel de control*

| Planta                                   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Figura                                                                               |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Planta de Control de Temperatura Amatrol | Diseñada para la regulación precisa de la temperatura en distintos procesos mediante el uso de sensores y actuadores. Permite estudiar estrategias avanzadas de control térmico.                                                                                                                                                                                    |   |
| Plantas de Control de Nivel              | Permiten el análisis y aplicación de técnicas de control para el mantenimiento de niveles de líquidos en tanques, utilizando sensores y válvulas de control automatizadas. Dentro de este laboratorio, se encuentra el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, el cual es objeto de estudio en este trabajo y ha sido viable su operatividad y aplicación académica |  |

| Planta                       | Descripción                                                                                                                                                                        | Figura                                                                             |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Planta de Control de Presión | Diseñada para el estudio de la regulación y control de presión en sistemas hidráulicos, permitiendo evaluar distintos métodos de control y su impacto en la eficiencia del sistema |  |

Nota: Elaboración propia en base a Fantino et al. [22]

Tabla II.  
Implementación de mejoras en el sistema eléctrico y de control

| Componente                 | Mejora Implementada                                                            | Figura Antes                                                                         | Figura Después                                                                        |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Planta de bomba centrífuga | Fortalecer el sistema y actualización de componentes                           |  |  |
| Borneras                   | Instalación de borneras industriales para mejorar la organización y seguridad. |   |  |

| Componente                      | Mejora Implementada                                                                                                                                                                          | Figura Antes                                                                        | Figura Después                                                                        |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Panel de control                | Sustitución del panel de madera por un panel de acrílico para mejorar la resistencia y seguridad, teniendo en cuenta principios de seguridad eléctrica y lineamientos de la normativa RETIE. |    |    |
| Bombas centrífugas              | Reemplazo de bomba inoperativa para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.                                                                                                         |    |    |
| Disyuntores                     | Instalación de dos disyuntores Schneider iC60N y luces indicadoras para facilitar el monitoreo. Se conservó el disyuntor Sassin 3SB5- 63 para alimentación general.                          | NO EXISTIAN                                                                         |   |
| Fuente de alimentación regulada | Reemplazo de tres fuentes cargadoras defectuosas (5V, 12V y 24V) por una Schneider regulada, mejorando la distribución de energía.                                                           |  |  |

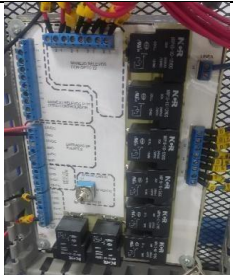
| Componente      | Mejora Implementada                                                                                                                                     | Figura Antes                                                                      | Figura Después                                                                      |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensor de nivel | Se implementó una solución basada en un potenciómetro para simular la lectura del nivel de líquido, evitando así la necesidad de un sensor ultrasónico. |  |  |

Nota: Elaboración propia a partir de Pico *et al.* [23]

En esta sección se va a describir cómo quedó la planta luego de tener como guía la normatividad RETIE. Se van a mostrar los planos eléctricos, la conexión de los componentes, la tabla V muestra esos componentes.

Tabla III.  
*Elementos del panel de control*

| Fotografía                                                                          | Nombre del Elemento       | Características                                                                | Especificaciones Técnicas                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                           | Protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Diseño modular para riel DIN.  | Dimensiones: 80x18x70 mm,<br>Material: Plástico de alta resistencia, Terminales: Tornillo, Capacidad: hasta 25 mm <sup>2</sup> |
|  | Disyuntor Schneider iC60N | Alta fiabilidad y durabilidad. Protección contra sobrecargas y cortocircuitos. | Dimensiones: 85x18x75 mm,<br>Material: Termoplástico, Terminales: Tornillo, Capacidad: hasta 25 mm <sup>2</sup>                |

| Fotografía                                                                          | Nombre del Elemento                                                                                    | Características                                                           | Especificaciones Técnicas                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Luces Indicadoras Verdes                                                                               | Indicador visual de estado encendido de las bombas y del todo el sistema. | Tensión: 110V DC, Tipo: LED, Color: Verde                                          |
|    | Perilla de Parada de Emergencia                                                                        | Botón de parada rápida para situaciones de emergencia.                    | Tipo: Mecanismo de empuje, Material: Plástico y metal, Dimensiones: 40 mm diámetro |
|   | Fuente de Alimentación Regulada Schneider 100-240 V CA a 24 V 31 A Monofásica Optimizada (ABLS1A24031) | Fuente de energía estable para componentes electrónicos.                  | Entrada: 100-240V AC, Salida: 24V DC, Corriente: 31A                               |
|  | Contactores SASSIN 3SC8                                                                                | Control de conexión y desconexión de circuitos eléctricos.                | Tensión: 24V DC, Corriente Nominal: 9A, Material: Plástico y metal                 |
|  | Tarjeta Controladora de Relvo                                                                          | Activación de relevos para el control de componentes.                     | Entradas: 8, Salidas: 8, Tensión: 24V DC                                           |

| Fotografía                                                                        | Nombre del Elemento         | Características                                       | Especificaciones Técnicas                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|  | Luces Indicadoras Amarillas | Indicador visual de estado encendido de las válvulas. | Tensión: 110V DC, Tipo: LED, Color: Amarillo |



Transmisor SIGNET 8550-1

Conversión de señales analógicas en digitales.

Entrada: 4-20mA, Salida: Digital, Tensión: 24V DC



Luces Indicadoras Azules

Indicador visual de estado encendido de las bombas

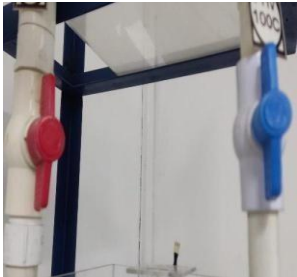
Tensión: 110V DC, Tipo: LED, Color: Azul

Tabla IV.

*Equipos de la planta de nivel de agua*

| Fotografía                                                                          | Nombre del Elemento | Características                        | Especificaciones Técnicas                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  | Tanque Reservorio   | Almacenamiento de Agua para el proceso | Material: Plástico, Color: Blanco, Forma: Cilíndrica, |

| Fotografía                                                                          | Nombre del Elemento         | Características                                     | Especificaciones Técnicas                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|     | Tanques en Acrílico         | Visualización del proceso de flujo y nivel de agua. | Material: Acrílico, Altura: 40cm                           |
|    | Bombas Centrífugas          | Movimiento de líquidos a través del sistema.        | Potencia: 0.373kW, Tensión: 110V                           |
|   | Válvulas Solenoides         | Control del flujo de líquidos en el sistema.        | Tipo: Solenoide, Tensión: 24V DC,                          |
|  | Válvulas Manuales de Bypass | Desviación manual del flujo de agua.                | Material: PVC, Diámetro: 1 pulgada                         |
|  | Servoválvula                | Ajuste preciso del flujo de agua.                   | Tipo: Eléctrica, Tensión: 24V DC, Rango de Control: 0-100% |

| Fotografía                                                                          | Nombre del Elemento          | Características                               | Especificaciones Técnicas                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Válvulas Manuales de PVC     | Control manual del flujo de agua.             | Material: PVC, Diámetro: 1 pulgada                                                        |
|    | Sensor de Caudal SIGNET 2100 | Medición de la tasa de flujo de agua.         | Rango: 0.5-100 l/min, Precisión: $\pm 1\%$ , Salida: 4-20 mA                              |
|  | Sensor de Nivel              | Medición del nivel de líquido en los tanques. | Tipo: Potenciómetro lineal rotativo<br><b>Resistencia nominal: 5 k<math>\Omega</math></b> |

### 3.2. Documentación del Sistema: Planos Eléctricos e Instrumentación

#### 3.2.1. Diseño de guías

Con el fin de facilitar la comprensión y el desarrollo de las prácticas en el laboratorio de procesos, se diseñaron dos guías de aprendizaje para que los docentes trabajen con sus estudiantes, una guía correspondiente al controlador PID y una segunda guía correspondiente al control ON/OFF. Cada guía cuenta con una introducción general de cada proceso a trabajar, los objetivos a alcanzar con el desarrollo de la guía, un breve marco conceptual, materiales y métodos a utilizar, el procedimiento a seguir para realizar la guía y la evaluación y resultados de la práctica.

### 3.3. Implementación del Sistema de Control

### **3.3.1. Diagrama ISA**

Los planos elaborados sirven como un recurso didáctico dentro del ámbito académico, al permitir a los estudiantes familiarizarse con la lectura e interpretación de diagramas eléctricos y de instrumentación que cumplen con normas de aceptación mundial. De esta manera, el proyecto no solo contribuye a la modernización del banco de pruebas, sino que también fortalece el proceso formativo al acercar a los futuros profesionales a prácticas alineadas con las exigencias de la industria.

### **3.3.2. Planos Elaborados según la Norma ISA**

#### **3.3.2.1. Plano de Instrumentación**

El plano de instrumentación muestra la disposición de los sensores de nivel y flujo, electroválvulas, transmisores y dispositivos de indicación. Como se muestra en la figura 8, los elementos y simbología en el plano han sido adaptados según la norma ISA, ilustrándose la integración de los mismos en la medición y control del flujo del agua entre el tanque principal, el tanque de reserva y un segundo tanque. Asimismo, en el plano se detallan los lazos de control para el nivel en ambos tanques, así como la medición y el control del caudal generado por las bombas centrífugas. Este esquema facilita la comprensión de la instrumentación utilizada para las pruebas de precisión y exactitud de los sensores de nivel y flujo en el sistema.

#### **3.3.2.2. Plano de conexiones**

Al analizar las conexiones entre los diferentes componentes del sistema, se evidencia una evolución significativa en la organización y claridad de los planos eléctricos, como puede observarse en las figuras 9 (esquema antiguo) y 10 (esquema actualizado). En el nuevo esquema, la disposición de los circuitos se presenta de manera mucho más estructurada, lo que permite identificar con mayor facilidad los elementos fundamentales del sistema, tales como los disyuntores, contactores, la servoválvula, el sensor de flujo y el sensor de nivel. Cada uno de estos componentes se encuentra claramente etiquetado, lo que no solo mejora la comprensión de su función dentro del sistema, sino que también facilita las tareas de mantenimiento, diagnóstico y enseñanza.

Una de las mejoras más notables en el esquema actualizado es la incorporación de una Tabla de Relés detallada, en la que se describen las funciones y conexiones de cada relé involucrado en la lógica de control. Este recurso resulta de gran utilidad para comprender de

manera integral la secuencia de operación y la lógica empleada en la automatización del proceso, contribuyendo a la estandarización y simplificación de futuras modificaciones o expansiones del sistema.

Asimismo, en el nuevo esquema se incluyen de forma explícita las conexiones de las fuentes de voltaje en corriente alterna (AC) hacia los distintos dispositivos, asegurando una correcta distribución y alimentación eléctrica. Esto no solo garantiza la confiabilidad del sistema durante la operación, sino que también reduce los riesgos asociados a fallos eléctricos por una conexión inadecuada o poco clara. En comparación con el esquema anterior, donde la disposición era menos organizada y presentaba limitaciones en la identificación de componentes, el diseño actual refleja una notable mejora en la organización, el nivel de precisión técnica y el profesionalismo, alineándose con las buenas prácticas de ingeniería y documentación técnica.

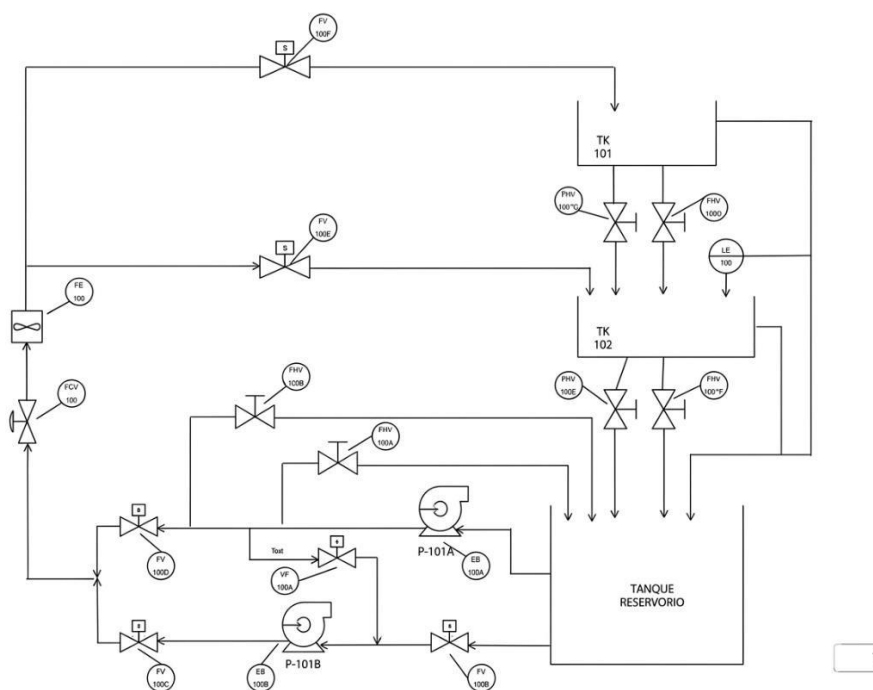


Fig. 8. Plano de Instrumentación

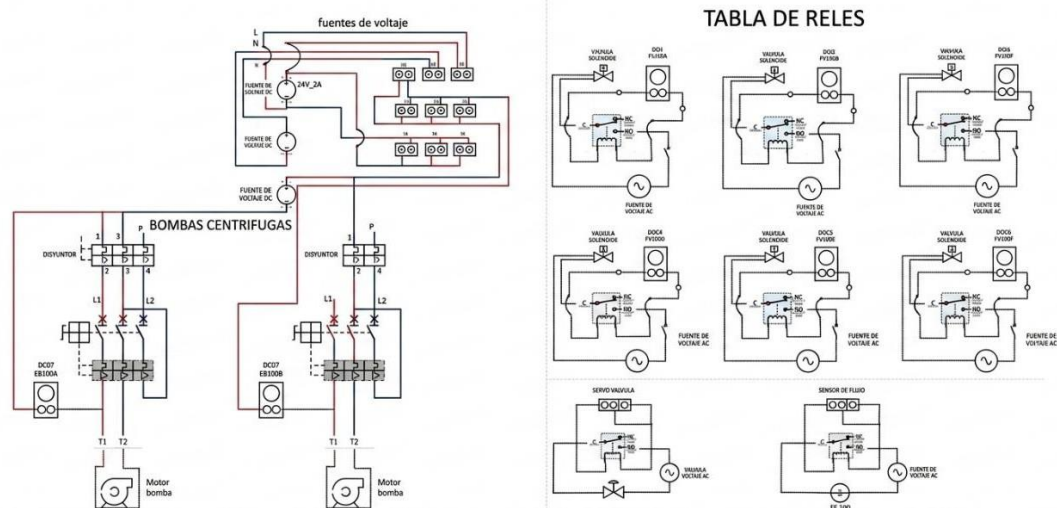


Fig. 9. Plano de conexiones: esquema antiguo.

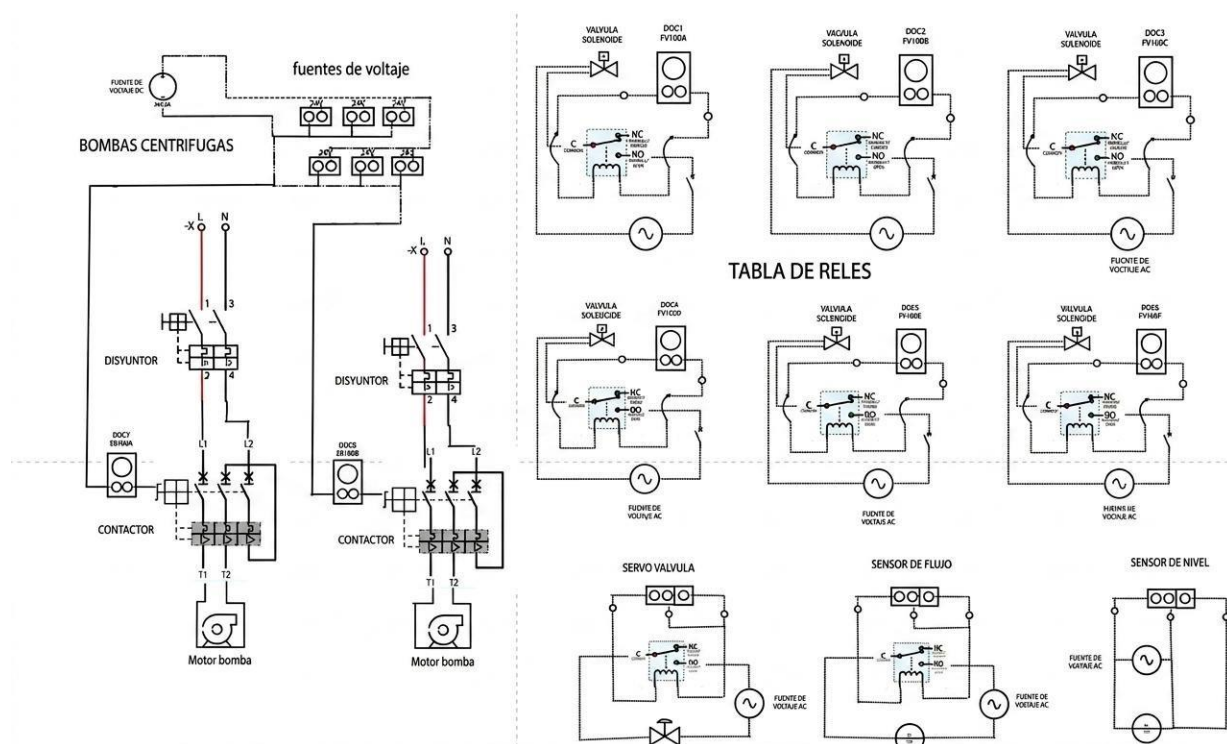


Fig. 10. Plano de conexiones: esquema nuevo.

### 3.3.3. Linealización por Tramos para el Sensor de Nivel

Como se detalló en el apartado 3.1, el sensor de nivel se conecta físicamente a una entrada analógica del PLC configurada con una resolución de lectura cruda de 0 a 10.000 (o 16.000, según el módulo específico utilizado). Para garantizar la viabilidad del control, es fundamental separar los conceptos en esta etapa: la digitalización de la señal analógica es un proceso exclusivo de Hardware realizado por el módulo de entradas del PLC, mientras que la linealización de esos datos es un tratamiento lógico realizado por Software.

Con el fin de mejorar la precisión de las mediciones, se aplicó un método de linealización por tramos mediante programación. Dentro de la lógica implementada en el código, se estructuró un bloque de conversión donde la variable proveniente del sensor pasa primero por una conversión de tipo entero (INT) a tipo real (REAL). Esto es crucial para permitir que el PLC realice operaciones matemáticas con decimales. Una vez calculada la ecuación de la recta para el tramo correspondiente, el bloque entrega la salida ("out") que actualiza la variable final denominada "sensoractual". Esta linealización corrige el comportamiento no lineal de la lectura, proporcionando mediciones exactas.

Para un tramo que abarca desde un punto  $x_i$  hasta  $x_i + 1$ , la relación lineal se define como:

$$y = m_i \cdot x + b_i \quad [26]$$

Donde:

$m_i$  es la pendiente del tramo, calculada como:

$$m_i = y_{i+1} - y_i$$

$$x_{i+1} - x_i$$

$b_i$  es la intersección con el eje, calculada como:

$$b_i = y_i - m_i \cdot x_i \quad [26]$$

Una vez determinada la función para cada tramo, el sistema selecciona el intervalo correspondiente según el voltaje medido y aplica la ecuación lineal para estimar el nivel del tanque [23].

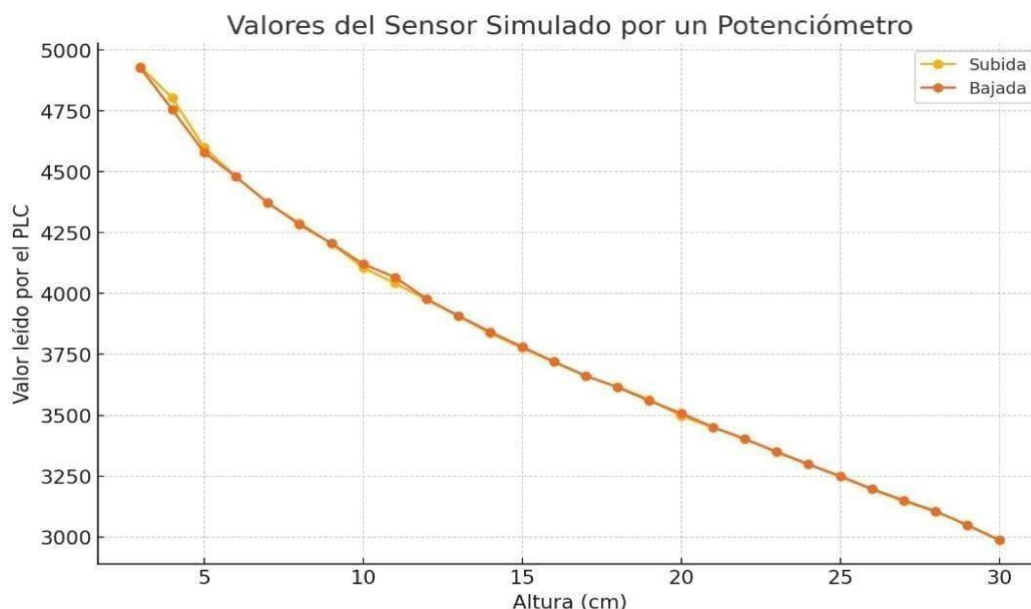


Fig. 11 Valores del Sensor Simulado por un Potenciómetro

### 3.3.4. Implementación del Controlador ON/OFF

Como primera estrategia de control, se programó un controlador ON/OFF. En el código del PLC, se establecieron bloques comparadores para definir una banda de histéresis. De este modo, a partir de una referencia establecida por el usuario, el programa controla el encendido y apagado de las bombas centrífugas.

Esta implementación de histéresis evita el encendido y apagado continuo y perjudicial de las bombas cuando el nivel del agua oscila levemente por la turbulencia.

#### 3.3.4.1. Integración del Control en el PLC Schneider M340.

La arquitectura de control fue implementada en un PLC Schneider M340. La operatividad del sistema se fundamenta en la adquisición de la señal analógica del sensor, la cual es digitalizada mediante el módulo de conversión A/D del controlador. Esta conversión permite a la CPU procesar la variable de nivel y ejecutar la lógica programada en tiempo real.

Para evitar la conmutación excesiva de los actuadores (fenómeno conocido como chattering), se programó una banda de histéresis entre los límites superior e inferior. Esto mitiga las variaciones indeseadas generadas por el oleaje del fluido, reduciendo el número de ciclos de encendido/apagado, lo que mejora la vida útil electromecánica de la bomba y las válvulas.

Adicionalmente, la capacidad del PLC para operar con protocolos como Modbus TCP facilita su futura integración con sistemas SCADA [24].

#### **3.3.4.2. Integración del Control On/Off En Unity Pro S.**

La programación del PLC Modicon M340 se desarrolló en el entorno Unity Pro S de Schneider Electric. Este software bajo la norma IEC 61131-3 permitió estructurar la lógica de control, configurar los direccionamientos de las tarjetas de entradas/salidas analógicas y digitales, y establecer las condiciones de enclavamiento de la bomba y válvulas. Previo a la descarga en el hardware, se utilizaron las herramientas de simulación del entorno para depurar la lógica, asegurando que las rutinas de histéresis operaran correctamente y garantizando una transición segura hacia el entorno operativo real [25].

#### **3.3.4.3. Proceso de Control.**

El ciclo de operación autónoma del sistema se ejecuta bajo la siguiente secuencia lógica:

- Inicio del Proceso: La bomba centrífuga se activa para impulsar el líquido hacia el tanque principal si la variable de proceso es inferior al umbral mínimo (Set Point inferior).
- Monitoreo del Nivel: El sensor linealizado retroalimenta al PLC con datos continuos sobre la altura de la columna de líquido.
- Gestión del Flujo (ON/OFF): Las válvulas solenoide actúan como elementos finales de control binario (abierto/cerrado), habilitando el paso del agua según la orden del PLC.
- Medición del Caudal: Un sensor de flujo en la línea principal cuantifica el volumen de agua circulante para fines de supervisión.
- Corte y Reinicio: Al alcanzar el umbral máximo, el PLC corta la señal de los actuadores. El ciclo se reinicia automáticamente cuando el tanque se vacía hasta el límite inferior.

#### **3.3.5. Implementación del Controlador PID y Método de Sintonización**

Con el objetivo de superar las limitaciones del sistema de control ON/OFF, se diseñó e implementó un lazo de control cerrado PID. Utilizando el mismo hardware (PLC M340) y software (Unity Pro S) mencionados en el apartado 3.2, esta estrategia busca mantener el nivel del tanque fijo en una referencia específica, manipulando de manera analógica la apertura de una servoválvula para lograr una operación más estable y disminuyendo las oscilaciones.

La configuración del lazo cerrado en Unity Pro S se llevó a cabo vinculando la señal digitalizada y linealizada del sensor (PV) con el bloque de función PID. Para lograr el accionamiento de la servoválvula, no se implementó un modelo matemático de escalado complejo; en su lugar, se configuró el envío de voltaje al actuador mediante un ajuste directo y progresivo basado en la observación física de la planta.

De igual manera, la sintonización del controlador se enfocó en la asignación iterativa de las variables Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (D). Este proceso se llevó a cabo utilizando el método empírico de ensayo y error, modificando los valores en el software y evaluando el comportamiento del nivel de agua en tiempo real hasta encontrar el balance adecuado que permitiera a la planta ajustarse a la referencia.

### 3.3.5.1. Parámetros del Bloque PID en Unity Pro S.

El control PID fue configurado en Unity Pro S mediante la implementación del bloque funcional PID (ver Fig. 12), donde se definieron los siguientes parámetros:

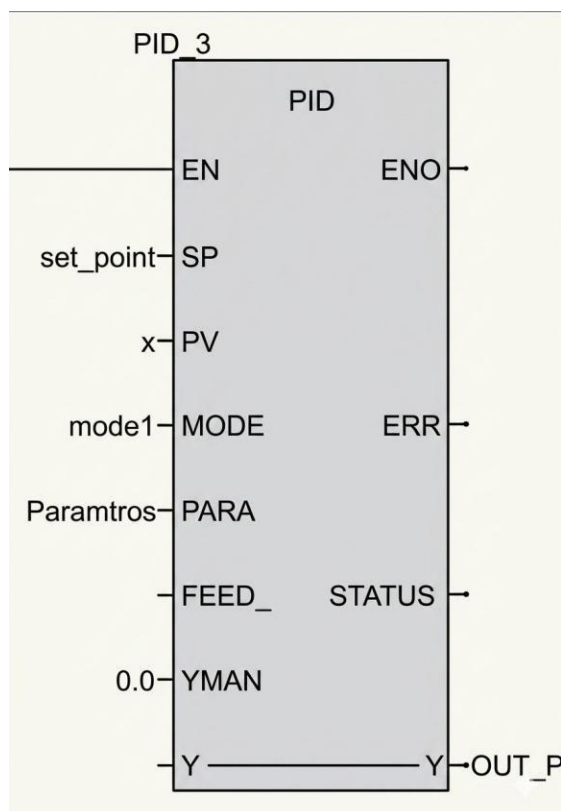


Fig. 12. Bloque PID.

Fuente: [26].

Tabla V.  
Parámetros de configuración del bloque PID

| Parámetro                   | Descripción                                                                                         |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Set Point (SP)              | Valor de referencia del nivel de líquido en el tanque.                                              |
| Variable de Proceso<br>(PV) | Señal de entrada que representa el nivel medido del tanque.                                         |
| Modo (MODE)                 | Determina si el PID opera en automático o manual.                                                   |
| Parámetros (PARA)           | Contiene los valores de ganancia proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativa ( $K_d$ ). |
| Salida PID (Y)              | Señal de control generada que ajusta la apertura de la servoválvula.                                |
| Estado (STATUS)             | Indica el estado de operación del bloque PID.                                                       |

### 3.3.6. Ajuste de Parámetros mediante Ensayo y Error

Durante la sintonización del controlador PID, se llevaron a cabo múltiples ajustes en los valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  utilizando el método de ensayo y error. En una configuración inicial con valores elevados de  $K_p$ , el sistema presentó un sobreimpulso significativo y oscilaciones pronunciadas en el nivel del tanque. Si bien el control respondía con mayor rapidez a las variaciones del nivel, la tendencia a presentar oscilaciones antes de alcanzar la estabilidad fue evidente.

La inclusión de  $K_i$  permitió corregir el error en estado estacionario, manteniendo el nivel del tanque más próximo al valor de referencia. No obstante, valores excesivos de  $K_i$  provocaron una respuesta lenta a los cambios en la entrada, generando retrasos en la corrección del nivel y afectando la estabilidad del sistema.

La incorporación del parámetro derivativo  $K_d$  en la estrategia de control aportó un efecto correctivo fundamental para mitigar los cambios bruscos en la señal de control, reduciendo de manera considerable la inestabilidad del sistema. Gracias a este ajuste, fue posible suavizar la respuesta dinámica del controlador, disminuyendo la aparición de sobreimpulsos y favoreciendo transiciones más progresivas ante variaciones en la demanda de flujo. Este comportamiento resulta especialmente ventajoso en sistemas donde la continuidad del proceso es esencial, ya que permite evitar fluctuaciones que podrían comprometer la eficiencia y la seguridad operativa.

Tras un proceso de ajuste iterativo de los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , se logró establecer una combinación óptima que mejoro un control balanceado del sistema. El parámetro proporcional  $K_p$  contribuyó a generar una respuesta inmediata frente a las desviaciones del nivel, mientras que el componente integral  $K_i$  corrigió los errores acumulativos a lo largo del tiempo, asegurando que el sistema alcanzara y mantuviera el valor de referencia deseado. Finalmente, el componente derivativo  $K_d$  actuó como un estabilizador que amortiguó los efectos de las variaciones rápidas, disminuyendo las oscilaciones y previniendo respuestas excesivamente agresivas.

Como resultado de esta sintonización conjunta, se consiguió mantener el nivel del tanque dentro del rango deseado con mayor precisión respecto al valor de referencia, minimizando tanto las oscilaciones como los tiempos de establecimiento. La comparación con el control ON/OFF evidenció mejoras notables, dado que el sistema bajo control PID presentó una respuesta más eficiente, estable y adaptable frente a perturbaciones externas. En consecuencia, el desempeño del banco de pruebas se optimizó significativamente, ofreciendo un funcionamiento más confiable y cercano a las condiciones ideales requeridas en escenarios académicos e industriales.

## Capítulo 4. Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras la puesta en marcha del banco de pruebas de bombas centrífugas rediseñado. El análisis de los hallazgos se ha estructurado en dos ejes fundamentales: uno técnico-operativo y otro de validación pedagógica.

En primer lugar, se evalúa el desempeño técnico y la respuesta dinámica del nivel del tanque bajo las dos estrategias de control implementadas en el PLC Schneider M340. Mediante el análisis de las tendencias gráficas extraídas de la interfaz HMI, se contrasta el comportamiento del sistema frente a perturbaciones y cambios de referencia operando bajo un control ON/OFF y un control PID.

En segundo lugar, se presentan los resultados correspondientes a la validación académica de las guías de laboratorio diseñadas. A través de la aplicación de encuestas a un grupo focal de estudiantes, se analizan métricas de percepción relacionadas con la claridad de la documentación teórica, la pertinencia de las simulaciones en Unity Pro S y el impacto general de la práctica en la comprensión de los sistemas de automatización industrial.

### 4.1. Resultados del Control ON/OFF

El control ON/OFF implementado en el PLC Schneider M340 basa su funcionamiento en una lógica de comparación por límites con histéresis. Para las pruebas de validación, se definieron como parámetros de operación un límite inferior de 20 cm y un límite superior de 23 cm. En las gráficas obtenidas de la interfaz HMI, la línea roja representa la variable de proceso (PV - Nivel del tanque), la línea verde el límite inferior y la línea azul el límite superior.

#### 4.1.1. *Llenado desde estado de reposo y estabilización*

En la figura 13, se observa el comportamiento del sistema arrancando desde un estado de reposo (tanque con nivel inferior al límite).

La variable de nivel (línea roja) presenta una pendiente positiva, lo que indica que la bomba centrífuga se encuentra en estado activo (ON) entregando su caudal máximo. Al cruzar el umbral de los 20 cm, el sistema mantiene la bomba encendida hasta alcanzar el límite crítico superior. Como se aprecia en la figura 14, una vez que el nivel toca los 23 cm, el controlador conmuta inmediatamente al estado inactivo (OFF), lo que significa que la bomba centrífuga se apaga. A partir de este punto, el nivel comienza a descender de manera progresiva debido a que el banco de pruebas cuenta con una válvula de salida abierta que genera un flujo de drenaje

constante. El sistema entra en un ciclo de oscilación controlada mostrado en la figura 15 por los límites establecidos: el nivel fluctúa estrictamente entre los 20 y 23 cm. Este comportamiento confirma que la lógica de histéresis programada cumple con el propósito de mantener el suministro de líquido sin someter a la bomba a conmutaciones de alta frecuencia que podrían degradar sus componentes internos.



Fig. 13. Respuesta de la variable de proceso.



Fig. 14. Respuesta de la variable de proceso llegando al límite superior.

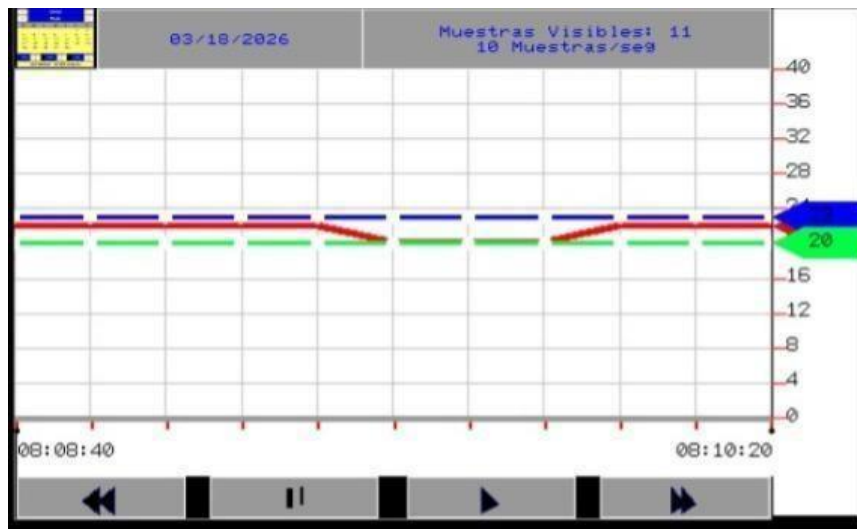


Fig. 15. Respuesta de la variable de proceso oscilando entre los límites superior e inferior.

#### 4.1.2. Comportamiento ante una Perturbación

Para validar la capacidad de respuesta del rediseño frente a eventos críticos, se indujo una perturbación manual mediante la apertura total de la válvula de descarga rápida. Este procedimiento permite observar cómo el algoritmo de control y la potencia de las bombas centrífugas actúan para recuperar la estabilidad del nivel.

En esta etapa inicial, como se observa en la figura 16, hay una caída drástica de la variable de proceso (línea roja). El nivel abandona la banda estable de 20-23 cm y desciende rápidamente hasta alcanzar un punto crítico cercano a los 5 cm. Ante esta condición, el controlador detecta que el nivel es inferior al límite de seguridad (20 cm) y mantiene la bomba centrífuga en estado activo (ON).

Una vez cesada la perturbación o superada la inercia del vaciado como se muestra en la figura 17, el sistema comienza la fase de recuperación. Se registra un cambio de tendencia en la gráfica, donde el nivel comienza a subir desde los 5 cm. En la captura se aprecia el tránsito de la variable roja alcanzando los 12 cm, evidenciando que el caudal entregado por la bomba es superior al flujo de salida actual del sistema.

En la figura 18, la variable de nivel continúa con una pendiente positiva pronunciada, lo que indica que la bomba permanece en estado ON entregando su caudal máximo. En este punto, la línea roja logra cruzar nuevamente el límite inferior de los 20 cm (línea verde), acercándose al valor de consigna superior para restablecer el ciclo normal.

Finalmente, la figura 19 muestra cómo el sistema reingresa completamente a su zona operativa. Al tocar el límite de los 23 cm (línea azul), el controlador conmuta al estado inactivo (OFF), apagando la bomba. A partir de este momento, el nivel retoma sus oscilaciones cíclicas controladas entre los dos umbrales, confirmando que el rediseño es capaz de recuperar la operatividad de la planta incluso tras perturbaciones que desplacen la variable de proceso a valores mínimos.



Fig. 16. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación

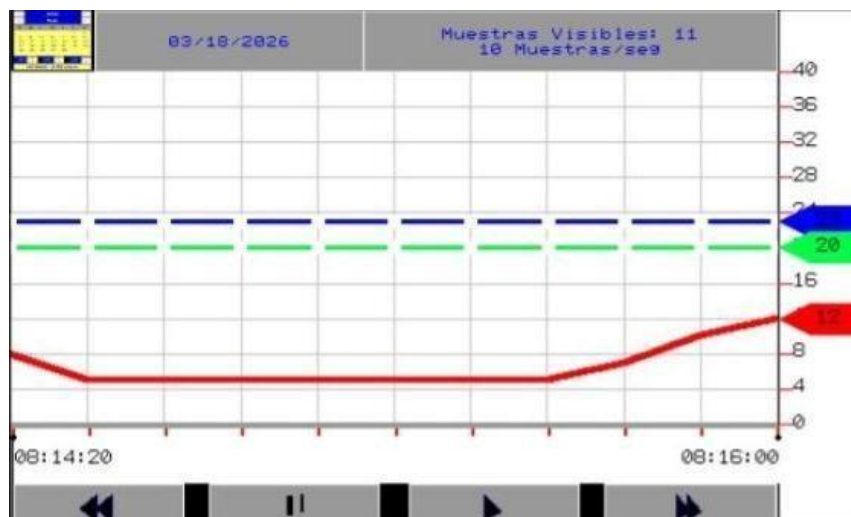


Fig. 17. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, recuperación.



Fig. 18. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, referencia. recuperado

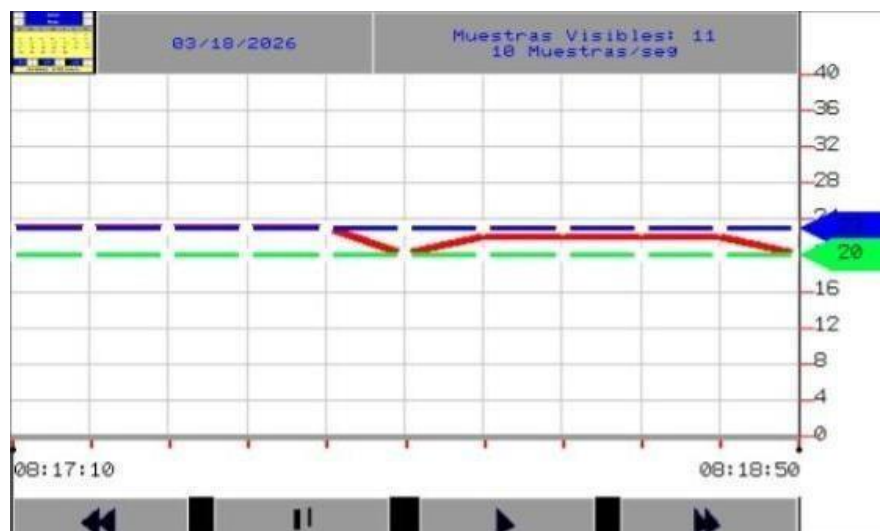


Fig. 19. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación, presenta oscilaciones

## 4.2. Control PID

A diferencia del control ON/OFF, el controlador PID permitió una regulación suave y precisa, manteniendo el nivel en un valor de consigna exacto sin las oscilaciones cíclicas de la histéresis. Para estas pruebas se utilizó un valor de referencia de 18 cm.

Para el análisis de los resultados es indispensable realizar una precisión técnica sobre la nomenclatura de los parámetros de sintonización empleados. En la configuración del software de control (Unity Pro S) y en el desarrollo de este proyecto, se distinguen los conceptos de Ganancia y Tiempos de Acción.

Aunque en el lenguaje académico es común referirse genéricamente a las "constantes" ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ), en la práctica industrial con PLCs Schneider se opera bajo el esquema de Ganancia Proporcional ( $K_p$ ), Tiempo Integral ( $T_i$ ) y Tiempo Derivativo ( $T_d$ ). Es fundamental no confundir la constante integral ( $K_i$ ) con el tiempo integral ( $T_i$ ), ya que este último es inversamente proporcional a la fuerza de la acción correctiva (a menor tiempo, mayor agresividad de control). Esta distinción es la que rige los valores observados en las tablas de configuración y las descripciones técnicas de las siguientes pruebas.

#### **4.2.1. Ganancia Proporcional $K_p$**

En esta primera etapa de la sintonización, se evaluó la respuesta del sistema variando únicamente la Ganancia Proporcional ( $K_p$ ), con el fin de observar la rapidez de la bomba para alcanzar el punto de referencia de 18 cm.

##### **4.2.1.1. $K_p$ 100.**

Al configurar el controlador con una ganancia de 100, se registraron las siguientes observaciones técnicas. Respuesta de Ascenso (ver figuras 20 y 21): Partiendo de un nivel inicial de 5 cm, el sistema activa el llenado. Sin embargo, se evidencia una pendiente de ascenso sumamente baja. Como se observa en la transición de la figura 21, el nivel progresa de forma muy lenta, lo que indica que la señal de control generada por esta ganancia mínima no imprime la potencia necesaria para una respuesta dinámica rápida.

Aunque el controlador logra aproximarse a la referencia, el tiempo de establecimiento es excesivo. En la figura 22, la variable de proceso (línea roja) se mantiene por debajo de la consigna durante varios ciclos de muestreo. Finalmente, se observa en la figura 23 que el nivel logra estacionarse sobre la línea verde de 18 cm.

Si bien con  $K_p = 100$  el sistema cumple con el objetivo de alcanzar el valor deseado sin presentar oscilaciones ni sobreimpulso, la respuesta es, en términos de ingeniería de control, "demasiado lenta". Para un entorno de laboratorio donde se requiere eficiencia en las prácticas, este valor de ganancia resulta insuficiente, ya que el sistema se comporta de manera perezosa ante la magnitud del error inicial. Esto justifica el incremento de la ganancia en las fases posteriores para mejorar la pendiente de llenado y reducir el tiempo de respuesta.

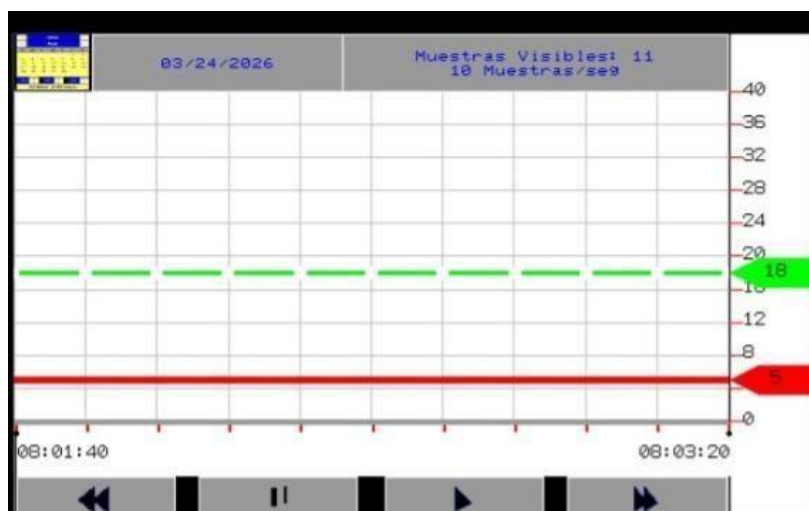


Fig. 20. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control

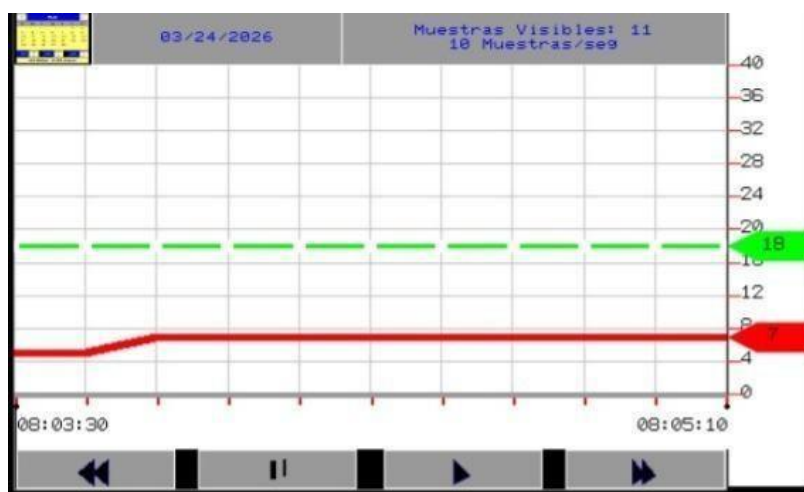


Fig. 21. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control



Fig. 22. Comportamiento de la variable de proceso reduciendo el error



Fig. 23. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la acción de control

#### 4.2.1.2. $K_p$ 1000.

En la segunda iteración de la sintonización, se incrementó el valor de la Ganancia Proporcional a 1000, lo que representa un valor diez veces superior al de la prueba inicial. Este ajuste busca corregir la lentitud en la respuesta transitoria observada anteriormente. Los resultados se detallan a continuación (ver figura 24 a 26):

Mejora en la Dinámica de Llenado (ver figura 24 y 25): Se observa un cambio notable en la pendiente de la variable de proceso (línea roja). Al arrancar desde el nivel de reposo, el sistema imprime mayor potencia a las bombas centrífugas. En la figura 24, el ascenso es mucho más decidido y vertical que en la prueba de  $K_p = 100$ , logrando alcanzar los 14 cm en un intervalo de tiempo significativamente menor (Figura 10H).

La mayor agresividad del control permite que el nivel alcance la línea verde de los 18 cm con rapidez (ver figura 26). A diferencia de la prueba anterior, donde el sistema parecía lento al acercarse a la referencia, aquí la acción proporcional mantiene el empuje necesario para vencer la inercia del sistema.

Finalmente, como se muestra en la figura 26, el sistema logra estacionarse sobre la referencia de manera sólida. La comparación visual entre los resultados de  $K_p = 100$  y  $K_p = 1000$  demuestra que, al aumentar la ganancia, se reduce drásticamente el tiempo de estabilización. El controlador ya no presenta una respuesta lenta, sino que actúa con una agilidad adecuada para

las necesidades operativas del banco de pruebas, manteniendo la estabilidad sin generar sobreimpulsos ni oscilaciones indeseadas.

El incremento de 10x en la variable proporcional fue acertado, ya que se logró una respuesta mucho más rápida y eficiente. No obstante, para determinar el límite operativo de la planta y buscar una respuesta aún más inmediata, se procedió a realizar una última prueba incrementando nuevamente la ganancia a un valor de 10000.



Fig. 24. Arranque del sistema con  $K_p=1000$  y pendiente de llenado pronunciada.



Fig. 25. Comportamiento de la variable de proceso con error de 2 cm



Fig. 26. Comportamiento de la variable de proceso alcanzando la referencia

#### 4.2.1.3. $K_p$ 10000.

En la tercera iteración de esta fase, se incrementó la ganancia proporcional a un valor de 10000, lo que representa un aumento de diez veces respecto a la prueba anterior. El objetivo fue alcanzar la máxima velocidad de respuesta que el sistema hidráulico permite antes de introducir las acciones integral y derivativa.

Al iniciar el proceso desde el nivel de reposo (5 cm), la variable de proceso (línea roja) exhibe la pendiente de ascenso más pronunciada de toda la fase proporcional (ver figura 27). Se observa que el sistema reacciona de manera inmediata al error inicial. En la figura 28, el nivel progresa aceleradamente, evidenciando que la bomba centrífuga opera con la potencia necesaria para una respuesta de alto desempeño bajo esta configuración de ganancia.

A medida que la variable se aproxima a la referencia de 18 cm (ver figura 29), la alta ganancia proporcional asegura que el flujo de llenado no decaiga ante la inercia del sistema. En la figura 29, se observa cómo la línea roja alcanza la referencia verde con una rapidez superior a las pruebas de 100 y 1000.

Finalmente, en la figura 30 se muestra cómo el sistema logra estabilizarse exactamente sobre los 18 cm. Lo más destacable de esta configuración es la drástica reducción del tiempo de asentamiento; el controlador ha logrado alcanzar el estado estable en el menor tiempo registrado durante las pruebas proporcionales. A pesar de la elevada ganancia, no se aprecian sobreimpulsos ni oscilaciones, lo que indica que el banco de pruebas posee una respuesta amortiguada que tolera configuraciones proporcionales agresivas.

Conclusión de la Fase 1: Tras comparar los tres escenarios de ganancia, se determina que  $K_p = 10000$  es el valor proporcional ideal para este rediseño, ya que proporciona la agilidad necesaria para las prácticas de laboratorio. Con este parámetro definido como base, se procede a la Fase 2, donde se incorporará el Tiempo Integral (Ti) para asegurar la eliminación total del error ante cambios en las condiciones de carga.



Fig. 27. Comportamiento de la variable de proceso con respuesta rápida



Fig. 28. Comportamiento de la variable de proceso alcanzando la referencia

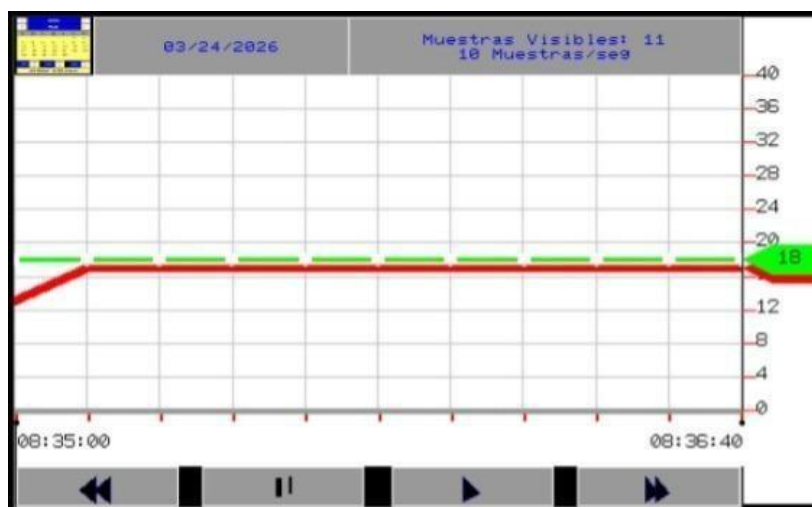


Fig. 29. Comportamiento de la variable de proceso con error en estado estacionario



Fig. 30. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna

#### 4.2.2. *Tiempo Integral $T_i$*

Una vez establecido el valor de  $K_p = 10000$  como la ganancia óptima para una respuesta dinámica rápida, se procedió a activar la acción integral. El objetivo de esta fase es asegurar que la variable de proceso alcance exactamente el Set Point de 18 cm, eliminando cualquier desviación residual que la acción proporcional por sí sola no pudiera corregir de forma inmediata.

#### 4.2.2.1. Ti 10.

Para la primera prueba de esta fase, se configuró un tiempo integral de 10 segundos, buscando una corrección rápida del error acumulado. Los resultados se observan en la figura 31 y 32.

Al iniciar el ciclo, la acción proporcional imprime la potencia máxima a la bomba, generando una pendiente de ascenso pronunciada. Simultáneamente, el Tiempo Integral de 10 segundos comienza a actuar rápidamente sobre la diferencia entre el nivel real y la consigna. En la figura 31, se observa cómo la línea roja progresa sin vacilaciones, superando los 12 cm y aproximándose con firmeza a la línea verde de referencia.

La variable de proceso alcanza los 18 cm de manera efectiva. A pesar de la agresividad de los parámetros ( $K_p$  alto y  $T_i$  bajo), el sistema no presenta sobreimpulso (overshoot) ni oscilaciones alrededor de la referencia. En la figura 32, se evidencia una línea roja perfectamente estable y alineada con el Set Point, lo que indica que el controlador logra compensar las pérdidas de flujo y mantener el nivel estacionario.

Esta configuración representa la respuesta más eficiente del sistema hasta el momento. El tiempo integral de 10 segundos es lo suficientemente corto para forzar al sistema a eliminar el error de estado estable de forma casi instantánea, pero lo suficientemente equilibrado para no desestabilizar la planta. Este resultado se alinea con lo que se denominará la "configuración récord" del banco de pruebas, logrando un equilibrio ideal entre rapidez y precisión.

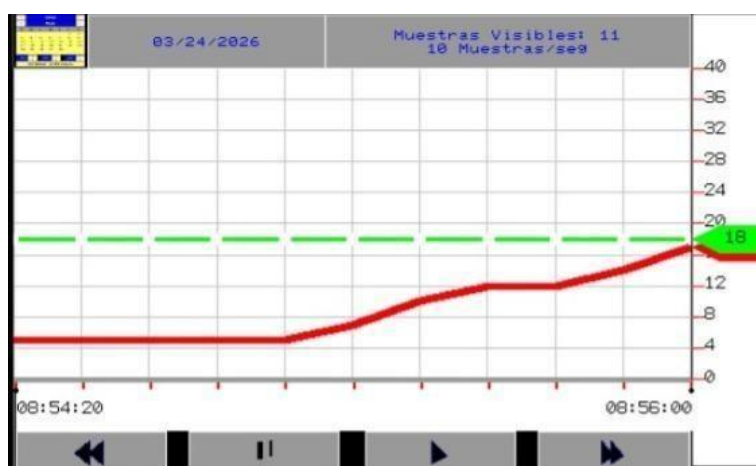


Fig. 31. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna



Fig. 32. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna

#### 4.2.2.2. $T_i$ 100.

Para esta segunda iteración de la fase integral, se mantuvo la ganancia proporcional en  $K_p = 10000$  y se aumentó el tiempo integral a 100 segundos. Este ajuste busca observar un comportamiento más conservador y suave en la corrección del error:

Al iniciar el proceso, la bomba responde con rapidez debido a la alta ganancia proporcional. Sin embargo, al aproximarse a los 14 cm, se percibe que el efecto del Tiempo Integral es más lento que en la prueba de 10 segundos. En la figura 33, la pendiente de la curva roja comienza a reducir su intensidad antes de tocar la referencia, lo que indica una acumulación de error más pausada por parte del algoritmo.

El nivel logra alcanzar la línea verde de 18 cm, pero le toma una mayor cantidad de ciclos de muestreo comparado con la configuración anterior. Como se observa en la figura 34, la variable de proceso se aproxima de forma asintótica y muy controlada, eliminando cualquier posibilidad de oscilación, pero sacrificando la agilidad de respuesta que caracteriza a este banco de pruebas.

Finalmente, el sistema se estaciona sobre el punto de referencia. En la figura 35, se aprecia una estabilidad absoluta de la línea roja. El controlador cumple su función de llevar el error de estado estable a cero, pero con una dinámica "perezosa" en el último tramo del llenado.

El cambio de  $T_i$  de 10 s a 100 s demuestra la relación inversa entre el tiempo integral y la agresividad del control: a mayor tiempo, la acción correctora es más débil. Para este banco de bombas, un  $T_i$  de 100 s resulta en un control lento que podría no ser eficiente ante perturbaciones rápidas, aunque garantiza una estabilidad superior para procesos que no admiten variaciones bruscas de flujo.



Fig. 33. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección



Fig. 34. Comportamiento de la variable de proceso llegando a la consigna



Interpretación Técnica Final: Esta prueba confirma que, para el banco de bombas centrífugas de la Corporación, un  $T_i$  de 1000 s es ineficiente. La acción correctiva es tan lenta que el sistema se comporta de forma similar a un control proporcional puro con un tiempo de establecimiento inaceptable para procesos dinámicos. Esto ratifica que el valor óptimo para esta planta es  $T_i = 10$  s, el cual proporciona la velocidad de eliminación de error necesaria.



Fig. 36. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección



Fig. 37. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización



Fig. 38. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización

#### 4.2.3. Tiempo Derivativo $T_d$

Con los valores de Ganancia Proporcional ( $K_p = 10000$ ) y Tiempo Integral ( $T_i = 10$  s) ya definidos por su eficiencia en la respuesta dinámica, se procedió a incorporar el tiempo derivativo ( $T_d$ ). El propósito de esta acción es anticiparse a la tendencia del error, actuando como un amortiguador que suaviza la llegada a la consigna y compensa las pequeñas perturbaciones causadas por la turbulencia del fluido dentro del tanque.

##### 4.2.3.1. $T_d$ 10.

Al iniciar el llenado desde el nivel de reposo, el sistema mantiene la rapidez de las pruebas anteriores. Sin embargo, se empieza a notar el efecto de la derivada en la suavidad de la curva roja. En la figura 39, a medida que el nivel supera los 12 cm, la pendiente de ascenso muestra una transición menos brusca, indicando que el controlador está analizando la velocidad de cambio para evitar un impacto seco contra la referencia.

El nivel alcanza los 18 cm de forma exitosa. La introducción del  $T_d = 10$  s ayuda a que la variable de proceso se acople a la línea verde de referencia con una mayor estabilidad visual. Como se observa en la figura 40, el sistema elimina cualquier amago de oscilación antes de estacionarse, logrando que el comportamiento de las bombas centrífugas sea más armónico con la dinámica del líquido.

La adición de la acción derivativa, incluso en un valor bajo como 10 segundos, ha permitido "afinar" el controlador. El sistema ya no solo es rápido y preciso, sino que ahora presenta un comportamiento más estable durante la fase de transición. Según la percepción en

campo, el controlador "va ajustándose mejor", lo que justifica continuar incrementando este valor en las siguientes pruebas para encontrar el punto de equilibrio óptimo entre rapidez y amortiguamiento total.



Fig. 39. Comportamiento de la variable de proceso inicio de corrección



Fig. 40. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización

#### 4.2.3.2. Td 100.

Para esta segunda prueba de la fase derivativa, se incrementó el valor a 100 segundos, multiplicando por diez la intensidad de la acción anticipatoria respecto al ensayo anterior. Se mantuvieron fijos los valores de Ganancia Proporcional  $K_p = 10000$  y Tiempo Integral  $T_i = 10$  s.

Al iniciar el llenado desde los 5 cm, se observa que la variable de proceso (línea roja) mantiene su agilidad característica. No obstante, el efecto de la acción derivativa es más evidente:

la curva presenta una transición de suavizado mucho más temprana. En la figura 41, se aprecia cómo el sistema detecta la velocidad de acercamiento a la referencia y comienza a ajustar la potencia de la bomba para un acople perfecto.

La variable alcanza los 18 cm sin rastro de sobreimpulso. El  $T_d = 100$  s actúa eficazmente "frenando" la inercia del líquido antes de que este supere la consigna. En la figura 42, la línea roja se une a la referencia verde de manera tangencial y suave, eliminando cualquier rastro de turbulencia en la lectura del sensor que pudiera causar inestabilidad.

El comportamiento final es de una estabilidad absoluta. Como se observa en la figura 43, el nivel se estaciona de forma lineal y firme sobre los 18 cm. Esta configuración logra compensar las micro-oscilaciones del fluido, resultando en un control de alta calidad que protege la vida útil de los actuadores al evitar cambios bruscos de señal.

Tras esta prueba, se concluye que  $T_d = 100$  s es el valor ideal para el banco de pruebas. La respuesta mejoró considerablemente respecto a los ensayos previos, logrando que el sistema sea rápido (gracias a  $K_p$  y  $T_i$ ) y extremadamente estable (gracias al amortiguamiento de  $T_d$ ). Esta combinación de parámetros permite al banco de bombas centrífugas operar en su punto de mayor eficiencia y confiabilidad académica.



Fig. 41. Comportamiento de la variable de proceso inicio de corrección



Fig. 42. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización



Fig. 43. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización

#### 4.2.3.3. Td 1000

En la última iteración de la sintonización, se incrementó el Tiempo Derivativo a 1000 segundos, multiplicando por diez el valor de la prueba anterior. El objetivo fue identificar el límite superior de la acción anticipatoria. Los resultados se detallan en la figura 44 y 45:

Al iniciar el llenado desde los 5 cm, se percibe un cambio drástico en la dinámica. Aunque la ganancia proporcional es alta, el Tiempo Derivativo de 1000 segundos actúa como un "freno" extremadamente fuerte desde el primer instante. En la figura 44, se observa que la pendiente de ascenso de la línea roja es significativamente menos pronunciada que en las pruebas de 10 s y 100 s, debido al intento del controlador por evitar cualquier cambio de nivel con demasiada agresividad.

La variable de proceso alcanza finalmente los 18 cm, pero le toma un tiempo considerablemente mayor. Como se aprecia en la figura 45, el acople con la referencia verde es tan pausado que el sistema pierde la agilidad necesaria para un proceso industrial eficiente. Este comportamiento se conoce técnicamente como un sistema sobre-amortiguado, donde la estabilidad es absoluta pero la respuesta transitoria es ineficiente por su lentitud.



Fig. 44. Comportamiento de la variable de proceso al iniciar la corrección



Fig. 45. Comportamiento de la variable de proceso en estabilización

Tras analizar los resultados de las tres fases (Proporcional, Integral y Derivativa), se determina que el exceso de  $T_d$  (1000 s) desmejora el rendimiento dinámico del banco. Por lo tanto, el equipo de trabajo define la configuración óptima para el banco de pruebas de la Corporación con los siguientes valores finales:

- Ganancia Proporcional ( $K_p$ ): 10000
- Tiempo Integral ( $T_i$ ): 10 s
- Tiempo Derivativo ( $T_d$ ): 100 s

Esta combinación (ver figura 46) garantiza un sistema con respuesta "récord" en tiempo de ascenso, eliminación total del error de estado estable y un amortiguamiento perfecto que protege la integridad mecánica de las bombas centrífugas.

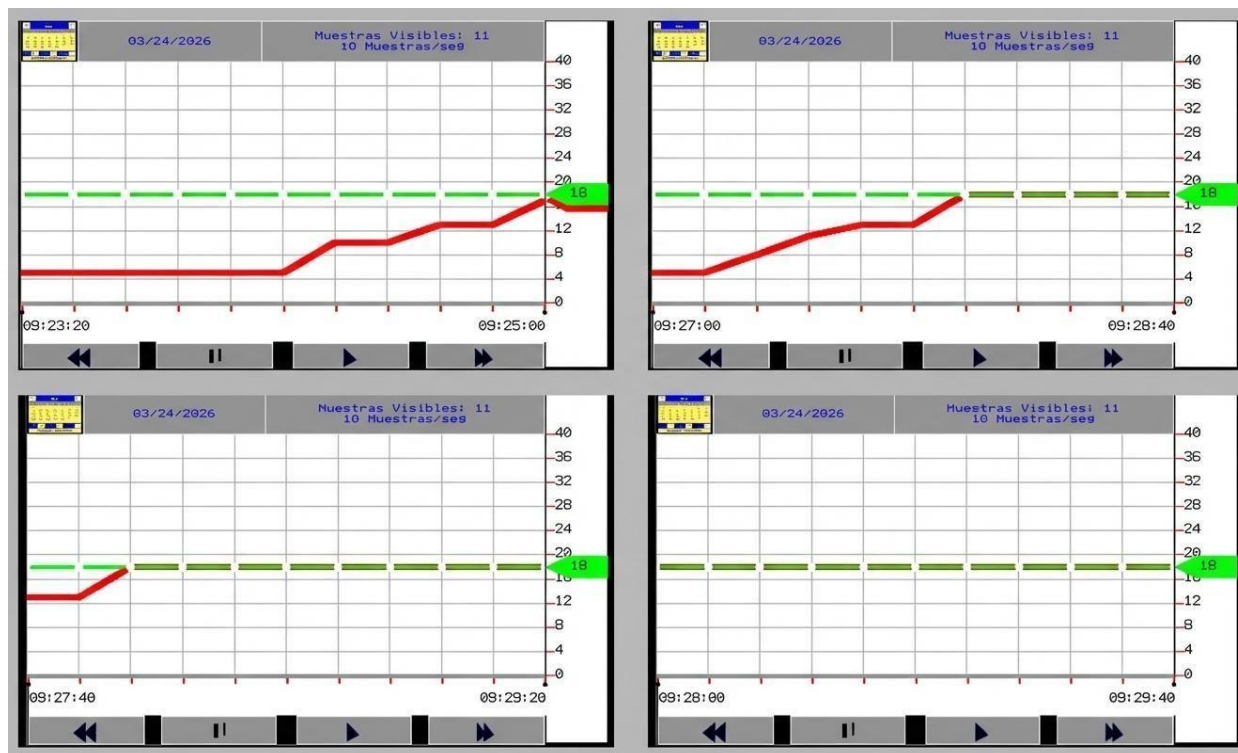


Fig. 46. Comportamiento de la variable de proceso con constantes sintonizadas

### 1. Comportamiento del Controlador ante una Perturbación

Una vez obtenida la sintonización óptima ( $K_p$ : 10000,  $T_i$ : 10 s,  $T_d$ : 100 s), se procedió a evaluar la capacidad del controlador PID para rechazar perturbaciones. Esta prueba es fundamental en ingeniería de procesos, ya que simula eventos reales como fugas súbitas o cambios inesperados en la demanda del fluido.

Con el sistema operando en estado estable sobre el valor de referencia de 18 cm, se introdujo una perturbación manual mediante la apertura de la válvula de descarga. Se observa (ver figura 47) una caída drástica del nivel (línea roja), alcanzando un punto crítico cercano a los 4 cm. En este instante, el error masivo activa la acción proporcional al máximo, mientras que el

tiempo integral ( $T_i$ ) comienza a acumular la desviación para forzar el incremento de potencia en las bombas.

Tras el cierre de la válvula de perturbación, el sistema inicia un ascenso progresivo (ver figura 48). A diferencia del control ON/OFF, aquí se aprecia una curva de recuperación suave y no oscilatoria. La variable de nivel alcanza los 12 cm de forma asintótica, demostrando que la sintonización permite una respuesta rápida pero amortiguada por la acción derivativa ( $T_d$ ), la cual predice el acercamiento a la referencia para evitar un sobreimpulso.

En la etapa final de la prueba (ver figura 49), se observa cómo la variable de proceso se acopla perfectamente a la línea verde de referencia. El sistema retorna al valor de referencia de 18 cm y permanece estable, sin las oscilaciones "diente de sierra" que caracterizaban al control binario. Este resultado confirma que el diseño del sistema de control PID no solo es preciso para el llenado inicial, sino que posee la robustez necesaria para autorregularse ante eventos críticos del proceso, garantizando la continuidad operativa del banco de pruebas.



Fig. 47. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación



Fig. 48. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación



Fig. 49. Comportamiento de la variable de proceso ante una perturbación

#### 4.3. Validación con estudiantes

Se aplicaron las guías diseñadas con un grupo de estudiantes, a fin de evidenciar el impacto de estas y el resultado de aprendizaje adquirido por parte de los alumnos. A continuación, se muestran imágenes de las prácticas desarrolladas con las guías.



planta.

A continuación se presentan parte de los resultados de las encuestas, las demás encuestas se encuentran al final en los anexos.

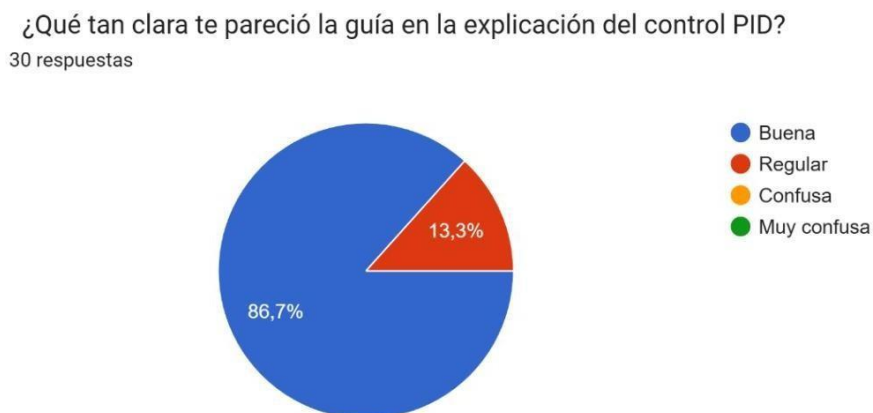


Fig. 51. explicación del PID

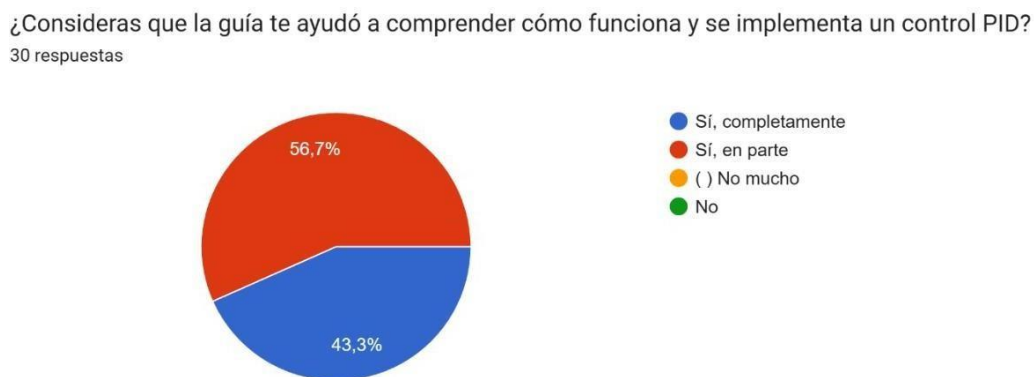


Fig. 52. Comprensión del PID

#### 4.3.1.1. Análisis.

Según los resultados anteriores, el controlador PID representa el nivel más alto de complejidad en el banco de pruebas. El análisis de la percepción estudiantil revela lo siguiente:

- **Asimilación de Conceptos Complejos:** El 86% de los estudiantes calificó la claridad de la guía muy buena (ver figura 51); no obstante, al indagar si la guía facilitó la comprensión total, un 56% indicó que lo hizo "En parte" (ver figura 52). Este dato es técnicamente relevante, ya que confirma que el PID, debido a su naturaleza matemática y de sintonización dinámica, requiere de un acompañamiento docente constante y no solo de material escrito.

- **Eficacia de la Simulación en Unity Pro S:** El 93.3% de los usuarios consideró la práctica en el software como "Útil" o "Muy útil". Esto valida la estrategia de utilizar herramientas industriales reales en lugar de simuladores genéricos, permitiendo al estudiante enfrentarse a variables de ingeniería (como el Gain y el Ti) antes de la puesta en marcha física.
- **Oportunidades de Mejora en el Diseño Curricular:** Un 53.3% de los encuestados sugirió la inclusión de más ejemplos prácticos. Se infiere que, si bien el rediseño eléctrico y de control es funcional, el proceso de aprendizaje se vería fortalecido mediante la creación de más escenarios de perturbación controlada en las guías futuras.

#### 4.3.2. Encuesta guía control ON/OFF

La validación del control ON/OFF se realizó con una muestra de 12 estudiantes, enfocándose en el aprendizaje de las bases de la automatización y la seguridad eléctrica. Las interrogantes planteadas en este módulo buscaron medir:

- Comprensión de lógica de control: Claridad en los conceptos de histéresis y estados binarios.
- Competencia en programación: Facilidad para la implementación de código en lenguaje Ladder.
- Autopercepción profesional: Nivel de confianza del estudiante para replicar lo aprendido en otros sistemas industriales.

A continuación, se presentan las figuras de esos resultados:

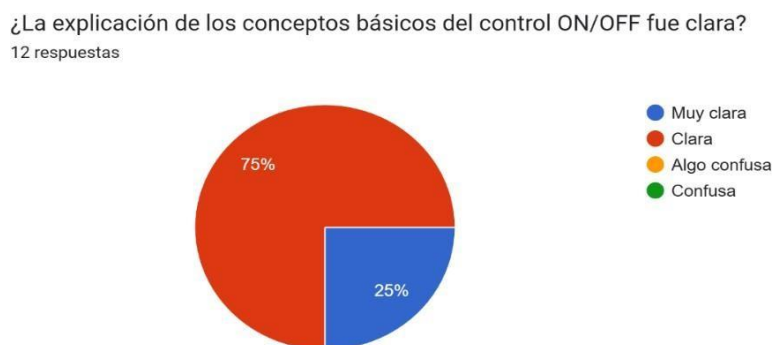


Fig. 53. Explicación del control ON/OFF

¿Los pasos para realizar el código en Ladder fueron fáciles de seguir?  
12 respuestas

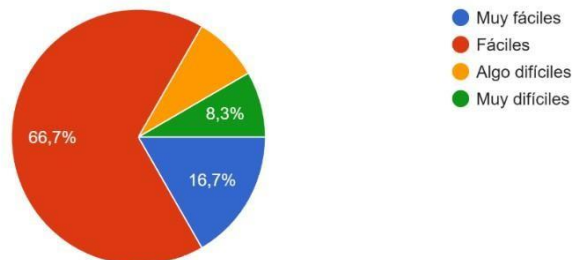


Fig. 54. Comprensión del ON/OFF

El control ON/OFF, al ser el primer contacto de los estudiantes con la automatización del banco, arrojó resultados que demuestran la consolidación de bases técnicas:

- **Dominio de la Lógica Programada:** El 83.4% de los estudiantes manifestó que los pasos para realizar el código en lenguaje Ladder fueron "Fáciles" o "Muy fáciles". Esto demuestra que el rediseño del sistema de control es intuitivo y que la arquitectura del PLC Schneider M340 es adecuada para fines pedagógicos de nivel inicial.
- **Transferencia de Conocimiento:** Un resultado destacable es que el 100% de los participantes afirmó entender el funcionamiento del control ON/OFF tras realizar la guía. Esto garantiza que el banco de pruebas cumple su función como puente entre la teoría de control y la aplicación física.
- **Proyección Profesional y Autoconfianza:** El 91.6% de los encuestados se siente capaz de implementar este control en otros sistemas (aunque un 58.3% reconoce que aún requeriría apoyo). Este nivel de confianza es un indicador de éxito para el proyecto, ya que uno de los fines del rediseño es que el estudiante pierda el miedo a interactuar con tableros eléctricos industriales de alta potencia.

## Capítulo 5. Discusión

Durante el diagnóstico se revelaron falencias en el sistema eléctrico, entre ellas la falta de organización de las protecciones, el deterioro del panel de control y la presencia de componentes que no funcionaban adecuadamente. Con la implementación del rediseño se mejoró este sistema mediante la organización del cableado con borneras, lo que optimizó su presentación y facilitó su mantenimiento. Estas mejoras en la infraestructura eléctrica y en los componentes mecánicos sentaron una base sólida para la implementación de los sistemas de control y la realización de prácticas académicas seguras y efectivas.

Por otro lado, el análisis del comportamiento del nivel del tanque bajo las estrategias de control implementadas reveló diferencias significativas entre el control ON/OFF y el control PID. El control ON/OFF demostró la capacidad de mantener el nivel del tanque dentro de rangos definidos con una estabilidad notable, especialmente después de la implementación de la linealización del sensor. Sin embargo, este control se caracteriza por la activación y desactivación abrupta de los actuadores, lo que, como se mencionó en la comparación teórica, puede generar un mayor desgaste en los componentes y un consumo energético menos eficiente a largo plazo.

En contraste, el control PID exhibió una regulación más suave y progresiva del nivel mediante la modulación de la servoválvula. Si bien las gráficas del HMI mostraron una respuesta dinámica con cierto sobreimpulso en algunas ocasiones y la presencia de pequeñas oscilaciones alrededor del punto de ajuste, el control PID demostró una mayor capacidad para seguir los cambios en la consigna y mantener la estabilidad con una acción de control continua y modulada.

De igual forma, el diseño y la implementación de guías de laboratorio específicas para el control ON/OFF y el control PID representaron una estrategia pedagógica altamente valiosa para la retroalimentación de los estudiantes. Estas guías fueron bien recibidas gracias a su claridad, organización y secuencialidad en la explicación de los contenidos, lo que facilitó la comprensión de los principios teóricos de cada sistema de control y su aplicación práctica en el banco de pruebas. Los estudiantes manifestaron que las guías fueron un apoyo clave para comprender no solo el funcionamiento de los controles, sino también los procedimientos necesarios para su implementación y ajuste en escenarios experimentales reales.

Un aspecto particularmente relevante fue la percepción unánime de los estudiantes en torno a la utilidad de las prácticas realizadas en el software Unity Pro S, especialmente para la aplicación del control PID. Esta experiencia subrayó la importancia de las herramientas de simulación como complemento a la práctica presencial en el laboratorio, ya que permite a los

estudiantes ensayar diferentes configuraciones, observar el comportamiento dinámico de los sistemas y anticipar posibles fallas, sin riesgos asociados a los equipos físicos. En este sentido, las guías de laboratorio se consolidaron como instrumentos efectivos para vincular la teoría con la práctica, incrementando la motivación y la participación activa de los estudiantes en los procesos de aprendizaje.

En relación con la documentación del sistema de control del banco de pruebas, esta se fortaleció de manera significativa mediante la elaboración de planos eléctricos e instrumentación fundamentados en los lineamientos de la Norma ISA. El uso de símbolos estandarizados según la Norma ISA-5.1 garantizó una correcta identificación de sensores, actuadores, dispositivos de control y conexiones eléctricas, lo cual facilita la interpretación de los diagramas por parte de cualquier persona familiarizada con la norma. Esta documentación profesionalizada no solo constituye un soporte esencial para las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, sino que también permite agilizar la resolución de problemas técnicos y planificar futuras modificaciones del sistema con mayor precisión técnica.

Adicionalmente, la documentación se convierte en un recurso pedagógico de gran valor, ya que brinda a los estudiantes la oportunidad de conocer e interpretar planos eléctricos e instrumentación elaborados con estándares internacionales, fomentando competencias prácticas alineadas con el ejercicio profesional. En consecuencia, tanto las guías de laboratorio como la documentación normalizada del sistema refuerzan de manera significativa la calidad del proceso formativo, asegurando un aprendizaje integral que combina teoría, práctica y estandarización técnica.

Como resultado de la implementación de los cambios en el sistema, se obtuvieron hallazgos que reflejan mejoras en aspectos clave como una mayor precisión en los sensores, una mayor precisión en la medición del nivel, menor tiempo de respuesta y una mejor experiencia formativa para los estudiantes. Estos resultados, sustentados en los datos experimentales recolectados durante las pruebas realizadas en el laboratorio, se analizan en este capítulo con el fin de evidenciar el impacto positivo de las modificaciones introducidas.

La incorporación del nuevo sistema de control permitió someter el banco de pruebas a diferentes escenarios de operación, lo que facilitó una evaluación integral de su desempeño. Entre los hallazgos más relevantes se destaca la estabilidad alcanzada en el seguimiento de los valores de referencia y una mayor precisión en los sensores, reduciendo significativamente el margen de error en comparación con las configuraciones anteriores. Esta mejora se tradujo en un control más preciso y confiable.

de variables críticas del proceso, garantizando una mayor consistencia en la respuesta del sistema.

De igual manera, se observó un menor tiempo de respuesta, lo que incrementó la eficiencia global en la regulación de los procesos controlados. Esta reducción en los retardos del sistema no solo fortaleció el desempeño técnico del banco de pruebas, sino que también potenció su utilidad en el ámbito académico, ya que permitió a los estudiantes interactuar con un entorno de aprendizaje más realista, dinámico y alineado con las exigencias actuales de la automatización industrial.

En conjunto, los resultados evidencian que las mejoras implementadas no solo solucionaron las problemáticas iniciales del sistema, sino que también aportaron un valor agregado a nivel pedagógico y técnico, consolidando el banco de pruebas como una herramienta robusta y eficiente para la enseñanza y experimentación en el campo de los sistemas de control.

Durante la implementación se empleó un sensor basado en potenciómetro para la medición del nivel, debido a que el sensor industrial adquirido por la universidad no pudo configurarse por restricciones de acceso y falta de soporte técnico del proveedor. Esta alternativa permitió continuar con el desarrollo y la validación de las prácticas sin afectar los objetivos académicos del proyecto; no obstante, su reemplazo por un sensor industrial queda planteado como una línea de trabajo futuro.

## Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros

El rediseño del sistema eléctrico del banco de pruebas de bombas centrífugas fue exitoso, ya que cumplió con la normatividad aplicable a la infraestructura eléctrica y permitió fortalecer la seguridad y protección de las personas que utilizan el laboratorio, así como la sostenibilidad y legalidad de su operación. Además, se incorporaron componentes que cumplen con estándares de calidad y favorecen un ambiente de enseñanza, aprendizaje e investigación seguro y confiable.

En lo que respecta al desarrollo de los sistemas de control convencional ON/OFF y PID en el banco de pruebas de bombas centrífugas, cabe resaltar que estos enriquecieron significativamente el valor de la práctica pedagógica en el laboratorio. Su implementación tuvo en cuenta las necesidades y requerimientos de los cursos que usan el laboratorio, permitiendo el diseño de una herramienta flexible que facilita el entendimiento de los sistemas de control ON/OFF y PID, el manejo de la planta y la interacción con el PLC. La combinación de los cambios realizados a los equipos y la incorporación de estos sistemas de control permite ofrecer a los estudiantes una experiencia de aprendizaje más completa y efectiva, que los prepara para enfrentar desafíos profesionales en el campo de la automatización y el control.

Asimismo, la implementación de un protocolo de pruebas y la elaboración detallada de guías de laboratorio permitieron realizar una evaluación sistemática y rigurosa del funcionamiento del banco de pruebas de bombas centrífugas. Los resultados demuestran mejoras significativas en la operación de la planta, especialmente en la confiabilidad y el tiempo de respuesta del sistema. La elaboración de guías que detallan los procesos a seguir facilita el desarrollo de experimentos controlados y replicables por los estudiantes, contribuyendo a una mayor comprensión de los procedimientos y de los objetivos de aprendizaje.

A partir de los resultados obtenidos y la retroalimentación de los estudiantes, se identifican varias líneas de trabajo futuro que podrían enriquecer aún más el banco de pruebas de bombas centrífugas y la experiencia de aprendizaje:

- **Implementación de un sensor de nivel industrial:** se propone sustituir la solución temporal basada en potenciómetro por un sensor industrial configurable y documentado, con el fin de ofrecer una experiencia más cercana al entorno real de la ingeniería y fortalecer la precisión de las mediciones durante las prácticas.
- **Desarrollo de Módulos de Control Avanzado:** Se podría considerar la implementación de estrategias de control más avanzadas, como el control adaptativo, el control predictivo o el control difuso, para exponer a los estudiantes a técnicas de control de vanguardia y ampliar las capacidades del banco de pruebas para la investigación.
- **Integración de un sistema de adquisición de datos dedicado:** se propone incorporar una herramienta específica para registrar de manera más precisa y eficiente las variables del proceso, facilitando el análisis de datos por parte de los estudiantes y la realización de proyectos de investigación más profundos.

## Referencias

- [1] E. A. Reyes Aguilera, «Prácticas de laboratorio: la antesala a la realidad», *Revista Multi-Ensayos*, vol. 6, n.º 11, pp. 61-66, ene. 2020, doi: 10.5377/multiensayos.v6i11.9290.
- [2] H. Ñaupas Paitán, M. R. Valdivia Dueñas, J. J. Palacios Vilela, y H. E. Romero Delgado, *Metodología de la investigación. Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*, 5 ed. Ediciones de la U, 2018.
- [3] F. H. Pereira Silva, «On/Off Control Versus PID Control: A Comparative Case Study On Condensers of Cooling Systems», en *Proceedings of The 4th International Conference on Advanced Research in Applied Science and Engineering*, GLOBALKS, sep. 2022. doi: 10.33422/4th.raseconf.2022.09.48.
- [4] S. Díaz Zagal, C. Y. A. Gutiérrez Estrada, y B. N. Flores Ramírez, «Sistema multiplataforma para el control de lazo abierto de un par de músculos artificiales de McKibben empleando IoT, en prácticas a distancia», *Revista Electrónica sobre Cuerpos Académicos y Grupos de Investigación*, vol. 10, n.º 19, pp. 154-176, 2023.
- [5] G. Yadav y K. Paul, «Architecture and security of SCADA systems: A review», *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34, p. 100433, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijcip.2021.100433.
- [6] Ministerio de Minas y Energía, «Resolución 40117 de 2024. Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE», abr. 2024.
- [7] International Society of Automation, «ANSI/ISA-5.1-2024, Instrumentation and Control – Symbols and Identification», 2024.
- [8] P. A. Daneri, *PLC, automatización y control industrial*. Editorial Hispano Americana HASA, 2008.
- [9] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*. Newnes, 2015.
- [10] W. Condori Parque, «Implementacion de un modulo neumático para el control de posicionamiento utilizando un controlador lógico programable», Trabajo de grado - pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/14ba7ec2-8410-488c-bc50-b7278caefe42>
- [11] M. Löppenberg y A. Schwung, «Self Optimisation and Automatic Code Generation by Evolutionary Algorithms in PLC based Controlling Processes», en *2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, jul. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/INDIN51400.2023.10218168.
- [12] G. Yadav y K. Paul, «Architecture and security of SCADA systems: A review», *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34, p. 100433, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijcip.2021.100433.
- [13] E. Aranburu, G. Lasa, J. K. Gerrikagoitia, y M. Mazmela, «Case Study of the Experience Capturer Evaluation Tool in the Design Process of an Industrial HMI», *Sustainability*, vol. 12, n.º 15, p. 6228, ago. 2020, doi: 10.3390/su12156228.

- [14] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 5 ed. Pearson, 2010.
- [15] F. I. Sánchez Gamboa, «Análisis de la eficiencia del control de un motor asincrónico mediante SVPWM en lazo abierto», Tesis de maestría, Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/items/a93ea16e-1007-43ba-a045-e812e34db9c2>
- [16] C.-S. Kang, C.-H. Hyun, y M. Park, «Fuzzy logic-based advanced on–off control for thermal comfort in residential buildings», *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 270-283, oct. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.119.
- [17] H. Wu, W. Su, y Z. Liu, «PID controllers: Design and tuning methods», en *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, IEEE, jun. 2014, pp. 808-813. doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931273.
- [18] K. J. Aström y T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. John Wiley & Sons, 1996.
- [19] G. R. Peñaloza-Mendoza, D. Adame-Resendis, y J. García-García, «Control PID aplicado a un prototipo de fototerapia», *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, pp. 53-58, nov. 2022, doi: 10.29057/icbi.v10iEspecial5.10128.
- [20] D. A. Montes López, «Implementación de un controlador predictivo no lineal y una estrategia de optimización en tiempo real a una planta piloto híbrida», Tesis de maestría, Universidad de Valladolid, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/46939>
- [21] A. I. Lakhani, M. A. Chowdhury, y Q. Lu, «Stability-preserving automatic tuning of PID control with reinforcement learning», *Complex Engineering Systems*, vol. 2, n.º 3, 2022, doi: 10.20517/ces.2021.15.
- [22] R. A. Fantino, C. A. Busada, y J. A. Solsona, «Nonlinear Automatic Power-Decoupling Control of a Differential Buck Grid-Tied DC–AC Converter», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 72, n.º 12, pp. 12878-12887, dic. 2025, doi: 10.1109/TIE.2025.3587130.
- [23] P. A. Pico, D. A. Aligia, C. H. De Angelo, y C. E. Escudero, «Implementation of an Initial Rotor Position Estimation for PMSM Drives Based on High Frequency Voltage Signal Injection», en *2024 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, IEEE, sep. 2024, pp. 1-8. doi: 10.1109/ARGENCON62399.2024.10735977.
- [24] Schneider Electric, «Modicon-M340. Procesadores, Manual de configuración», 2019.
- [25] Schneider Electric, «EcoStruxure™ Control Expert – Lenguajes y estructura del programa, Manual de referencia», 2022.
- [26] Y. P. Kondratenko, V. F. Gubarev, A. A. Chikrii, y V. M. Kuntsevich, *Advanced Control Systems: Theory and Applications*. New York: River Publishers, 2022. doi: 10.1201/9781003337010.
- [27] L. D. Feisel y A. J. Rosa, "The role of the laboratory in undergraduate engineering education", *Journal of Engineering Education*, vol. 94, n.o 1, pp. 121-130, ene. 2005, doi: 10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x.
- [28] ABET Engineering Accreditation Commission, *Criteria for Accrediting Engineering Programs*, 2025-2026. Baltimore, MD, USA: ABET, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/criteria-for-accrediting->

- [29] International Engineering Alliance, Graduate Attributes and Professional Competencies, versión 2021.1, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ieagreements.org/assets/Uploads/IEA-Graduate-Attributes-and-Professional-Competencies-2021.1-Sept-2021.pdf>
- [30] National Fire Protection Association, NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace, 2024 ed. Quincy, MA, USA: NFPA, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://link.nfpa.org/all-publications/70E/2024>
- [31] International Electrotechnical Commission, IEC 60204-1:2016+AMD1:2021 CSV, Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements. Geneva, Switzerland: IEC, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/en/publication/71256>

## Anexos

### Anexo 1. Guía Control PID

|                                                                                  |                                                                                                                  |                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>LABORATORIOS INSTITUCIONALES</b><br>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca<br>Dirección de Laboratorios | <b>Guía Práctica de Laboratorios</b><br>Facultad de Ingeniería<br>Programa de Ingeniería Electrónica |
|                                                                                  |                                                                                                                  |                                                                                                      |

|                        |                                         |
|------------------------|-----------------------------------------|
| Nombre del Curso:      | Guía No. 1                              |
| Semestre:              | Laboratorio:                            |
| Ubicación:             | Sede Laboratorios – Carrera 3 No. 2-60. |
| Área de Formación:     |                                         |
| Duración:              | 2 horas                                 |
| Nombre de la Práctica: | Control De procesos                     |

#### 1. Introducción

El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es una de las técnicas más utilizadas en la automatización industrial debido a su capacidad para ajustar y estabilizar sistemas dinámicos. Este tipo de control combina tres componentes:

- **Proporcional (P):** Responde a la magnitud del error presente.
- **Integral (I):** Compensa errores acumulativos a lo largo del tiempo.
- **Derivativo (D):** Predice tendencias futuras en el error, basándose en su tasa de cambio.

El control PID se emplea ampliamente en procesos industriales que requieren precisión, como la regulación de temperatura, presión, velocidad y nivel de líquidos. Su aplicación asegura estabilidad, reducción de oscilaciones y respuesta óptima ante perturbaciones. La configuración de los parámetros del PID generalmente requiere un proceso de sintonización. Uno de los métodos más utilizados para este propósito es el método de ensayo y error, el cual implica ajustar iterativamente los valores de los parámetros P, I y D hasta lograr un desempeño estable y eficiente del sistema. [1] [2]

Uno de los métodos más utilizados para configurar un PID es el **método de ensayo y error**, que consiste en ajustar iterativamente los valores de P, I y D hasta lograr una respuesta estable y eficiente del sistema. Este proceso implica:

- Establecer un valor inicial para la ganancia proporcional (P) y observar la respuesta.
- Ajustar el término integral (I) para reducir errores acumulados en el tiempo.
- Modificar el término derivativo (D) para minimizar las oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema.
- Repetir estos ajustes hasta alcanzar un control óptimo.

Este enfoque experimental permite encontrar parámetros adecuados para cada aplicación específica. [3]

|                                                                                   |                                                                                                                  |                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>LABORATORIOS INSTITUCIONALES</b><br>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca<br>Dirección de Laboratorios | <b>Guía Práctica de Laboratorios</b><br>Facultad de Ingeniería<br>Programa de Ingeniería Electrónica |
|                                                                                   |                                                                                                                  |                                                                                                      |

#### 2. Objetivo

##### Objetivo General

- Implementar y validar un sistema de control PID utilizando el software Unity Pro S en un PLC Schneider Modicon M340.

##### Objetivos Específicos

- Configurar las variables del sistema y asignar entradas y salidas en Unity Pro S.
- Implementar el bloque PID y realizar pruebas de ajuste mediante el método de ensayo y error.

#### 3. Materiales y Herramientas

- PLC Schneider Modicon M340.
- Software Unity Pro S (EcoStruxure Control Expert).
- Potenciómetro para simulación del sensor de nivel.
- Servoválvulas.
- Computadora con licencia del software.

#### 4. Cálculo de la Linealización por Tramos

Para mejorar la precisión de las mediciones del sensor de nivel, se aplica la técnica de **linealización por tramos**. La ecuación utilizada es:

$$y = mi \cdot x + bi$$

Donde:

- $y$ : Altura medida en el tanque (cm)
- $x$ : Valor de entrada medido (voltaje del sensor en V).
- $mi$  es la **pendiente del tramo**, calculada como:

$$mi = \frac{y^{i+1} - y^i}{x^{i+1} - x^i}$$

Esto representa la **tasa de cambio** del nivel con respecto al voltaje del sensor



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

**Guía Práctica de Laboratorios**  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

- $B_i$  Ajusta la ecuación para asegurar que el modelo sea preciso en cada tramo, calculada como:

$$b_i = y_i - m_i \cdot x_i$$

Representa el **desplazamiento vertical** en la relación entre voltaje y nivel.

¿Qué significa cada valor?

- $X_i$  y  $x_i + 1$ : Son las alturas del tanque en dos puntos consecutivos de medición.
- $Y_i$  y  $y_i + 1$ : Son los valores digitales leídos por el PLC correspondientes a esas alturas.
- $m_i$ : Indica cuánto varía el nivel del tanque cuando cambia el voltaje.
- $B_i$ : Ajusta la ecuación para asegurar que el modelo sea preciso en cada tramo.

##### 5. Procedimiento

###### Configuración Inicial del Sistema

1. Definir las variables de entrada y salida en Unity Pro S.
2. Vincular el sensor de nivel simulado al PLC.

###### Programación del Control PID en Unity Pro S

1. **Conversión de la Señal del Sensor**
  - Utilizar el bloque INT\_TO\_REAL para convertir la entrada del sensor de nivel a formato real.
  - Asignar el valor convertido a una variable real (por ejemplo, Nivel\_Actual).
2. **Configuración del Bloque PID**
  - Insertar el bloque PID en el programa de Unity Pro S.
  - Configurar los parámetros:
    - **Set Point (SP)**: Nivel deseado del tanque.
3. **Conversión de la Salida PID**
  - Usar el bloque REAL\_TO\_INT para convertir la salida del PID (Out\_PID) a formato entero.
  - Asignar esta salida a la variable de control de la servoválvula.
4. **Validación y Pruebas**
  - Ejecutar simulaciones en Unity Pro S para comprobar el comportamiento del PID.
  - Ajustar los valores de P, I y D mediante **ensayo y error** para optimizar la respuesta del sistema.
  - Comparar los resultados con los valores teóricos esperados.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

**Guía Práctica de Laboratorios**  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

##### Bibliografía

- [1] J. G. e. al, «Calibración y linealización de sensores ultrasónicos para mediciones industriales,» *Revista Iberoamericana de Automática y Control*, 2020.
- [2] E. Schneider Electric, «Control Expert,» 2020.
- [3] F. S. K. Åström & R. Murray, «Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers,» Princeton University Press,» 2010.

## Anexo 2. Guía Control ON/OFF

|                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                      |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  <b>LABORATORIOS INSTITUCIONALES</b><br>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca<br>Dirección de Laboratorios | <b>Guía Práctica de Laboratorios</b><br>Facultad de Ingeniería<br>Programa de Ingeniería Electrónica |  |
|                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                      |  |

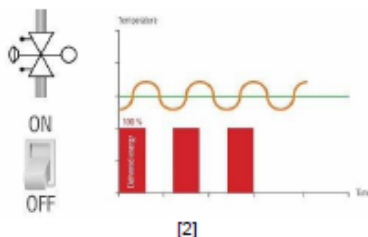
|                                                    |                |
|----------------------------------------------------|----------------|
| Nombre del Curso:                                  | Guía No. 1     |
| Semestre:                                          | Laboratorio:   |
| Ubicación: Sede Laboratorios – Carrera 3 No. 2-60, |                |
| Área de Formación:                                 |                |
| Duración: 2 Horas                                  |                |
| Nombre de la Práctica:                             | Control ON/OFF |

### 1. Introducción al Control ON/OFF

#### ¿Qué es un Control ON/OFF?

El control ON/OFF es una estrategia de regulación que activa o desactiva un actuador con base en una comparación entre el estado deseado y el estado real del sistema. Existen dos modos principales: el modo comparativo, que conmuta la salida según la comparación directa entre la variable de proceso y el set point; y el modo de frecuencia fija, que relaciona la señal de entrada con la variable controlada. Principios del Control ON/OFF [1]

- **Encendido:** El actuador se activa cuando la variable controlada cae por debajo de un valor definido.
- **Apagado:** El actuador se desactiva cuando la variable alcanza o supera el set point. [1]



[2]

#### Importancia del Set Point y la Histéresis

El set point es el valor objetivo que se desea mantener. Para evitar oscilaciones constantes (conmutaciones rápidas), se introduce un rango de histéresis: una diferencia entre el valor de encendido y el de apagado.

**Ejemplo:** Si el set point es 15 cm, la bomba puede encenderse al bajar a 14 cm y apagarse al alcanzar 16 cm [3]

|                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                      |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  <b>LABORATORIOS INSTITUCIONALES</b><br>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca<br>Dirección de Laboratorios | <b>Guía Práctica de Laboratorios</b><br>Facultad de Ingeniería<br>Programa de Ingeniería Electrónica |  |
|                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                      |  |

### 2. OBJETIVOS

#### OBJETIVO GENERAL:

- Rediseñar el sistema de control para la planta del banco de pruebas de bombas centrífugas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desarrollar sistemas de control ON/OFF en función de los requerimientos de los cursos vinculados al uso de esta planta.
- Analizar la relación entre el set point, histéresis y comportamiento del sistema.
- Evaluar el desempeño del control ON/OFF en la regulación de nivel de un tanque.

### 3. Descripción del PLC Schneider M340

#### ¿Qué es un PLC?

Un PLC (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo electrónico que toma decisiones basadas en entradas de sensores y activa salidas hacia actuadores. Es ideal para automatizar procesos industriales. [4]

#### Aplicación en el Banco de Pruebas

En este proyecto, el PLC Schneider M340 recibe la señal de un potenciómetro de 5k que simula el nivel del tanque. Con base en el control ON/OFF configurado, activa o desactiva las bombas para mantener el nivel dentro del rango deseado.

### 4. Procedimiento

#### Diseño del sistema de control ON/OFF

- Definir el set point y los límites inferior y superior para el control del nivel del tanque.
- Elaborar el diagrama de conexión del PLC con el sensor (potenciómetro) y las bombas.

#### Montaje y pruebas del sistema

- Conectar el PLC Schneider M340 al banco de pruebas.
- Configurar las entradas analógicas y salidas digitales en Unity Pro S.
- Implementar la lógica de control ON/OFF.
- Realizar pruebas para verificar el encendido y apagado correcto de las bombas según los límites definidos.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

Guía Práctica de Laboratorios  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

### Configuración del Set Point en Unity Pro S

- Abrir el software Unity Pro S y cargar el proyecto correspondiente.
- Seleccionar la entrada analógica correspondiente al sensor de nivel.
- Definir el set point en la programación del PLC, estableciendo los valores máximos y mínimos deseados.
- Guardar la configuración y compilar el programa para validar su correcto funcionamiento.

### linealización por tramos

Para mejorar la precisión de las mediciones del sensor de nivel, se aplicó un método de linealización por tramos. Se realizó una comparación entre el voltaje medido por el sensor y la altura real del tanque, lo que permitió definir una función de transferencia precisa.

Esta técnica corrige variaciones no lineales en la lectura del sensor, proporcionando mediciones más exactas y asegurando que el sistema PID opere con mayor confiabilidad.

### Cálculo de la Linealización por Tramos

Para un tramo que abarca desde un punto  $x_i$  hasta  $x_{i+1}$ , la relación lineal se define como:

$$y = m_i \cdot x + b_i$$

Donde:

- $y$ : Altura medida en el tanque (cm)
- $x$ : Valor de entrada medido (voltaje del sensor en V).
- $m_i$  es la **pendiente del tramo**, calculada como:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

Esto representa la **tasa de cambio** del nivel con respecto al voltaje del sensor.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

Guía Práctica de Laboratorios  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

- $b_i$  Ajusta la ecuación para asegurar que el modelo sea preciso en cada tramo, calculada como:

$$b_i = y_i - m_i \cdot x_i$$

Representa el **desplazamiento vertical** en la relación entre voltaje y nivel.

### Ejemplo de Cálculo

Supongamos que tenemos los siguientes datos:

| Altura del tanque (cm) | Valor digital del PLC |
|------------------------|-----------------------|
| 10 cm                  | 200                   |
| 30 cm                  | 600                   |

Queremos obtener la ecuación de la recta en la forma  $y = m \cdot x + b$  que relacione la altura del tanque ( $x$ ) con el valor digital leído por el PLC ( $y$ ).

#### 1. Cálculo de la pendiente ( $m$ ):

La pendiente se calcula con la fórmula:

$$m = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

Sustituyendo los valores:

$$m = \frac{600 - 200}{30 - 10} = \frac{400}{20} = 20$$

#### 2. Cálculo de la intersección ( $b$ ):

La intersección con el eje  $y$  se obtiene con:



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

**Guía Práctica de Laboratorios**  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

$$b = y_i - m \cdot x_i$$

Sustituyendo los valores:

$$b = 200 - (20 \cdot 10) = 200 - 200 = 0$$

### 3. Ecuación final del tramo:

Si queremos saber cual será el valor digital del PLC cuando el nivel del tanque esté en 25 cm, sustituimos:

$$y = 20 \cdot 25 = 500$$

Por lo tanto, el PLC leerá 500 cuando el nivel del tanque esté en 25 cm.

## 5. Evaluación y Resultados:

### 1. Resultados esperados:

- Validación del funcionamiento correcto del control ON/OFF.
- Análisis de histéresis y su impacto en la estabilidad del sistema.
- Registro de valores medidos y comparación con valores teóricos.

### 2. Tiempo estimado de la práctica:

- 2 horas



LABORATORIOS INSTITUCIONALES  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Dirección de Laboratorios

**Guía Práctica de Laboratorios**  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica

### 3. Conocimientos previos requeridos:

- Principios de control automático.
- Conceptos básicos de sensores y actuadores.
- Programación de PLCs en Unity

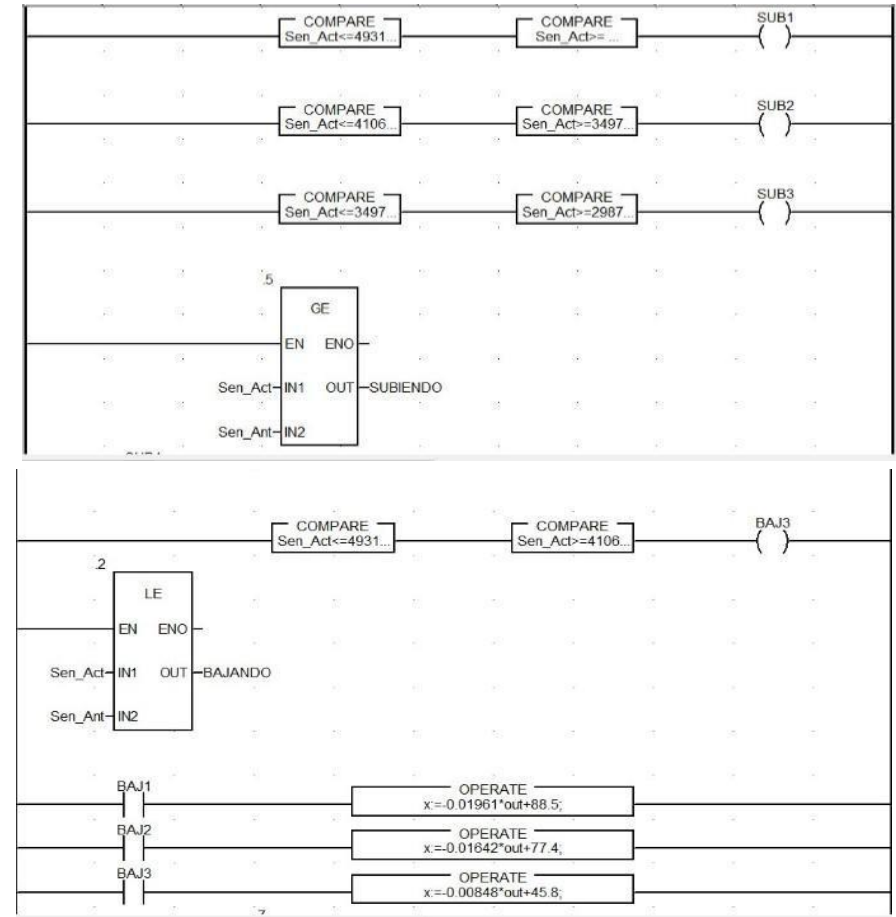
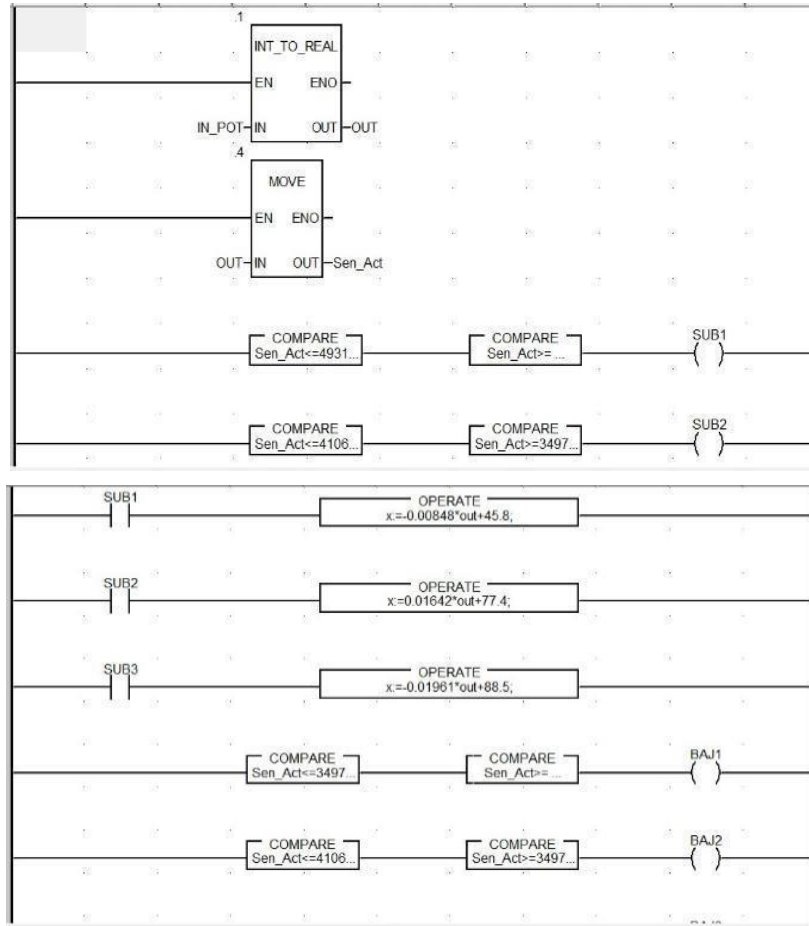
### 4. Evidencias a entregar:

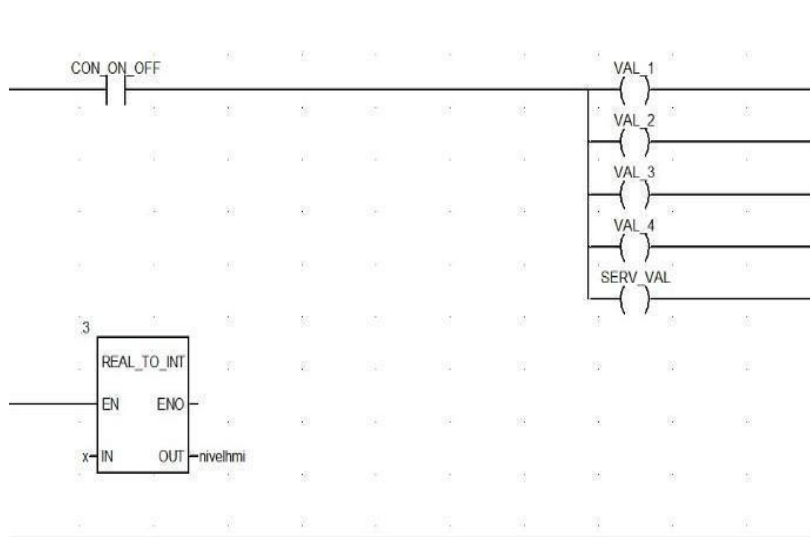
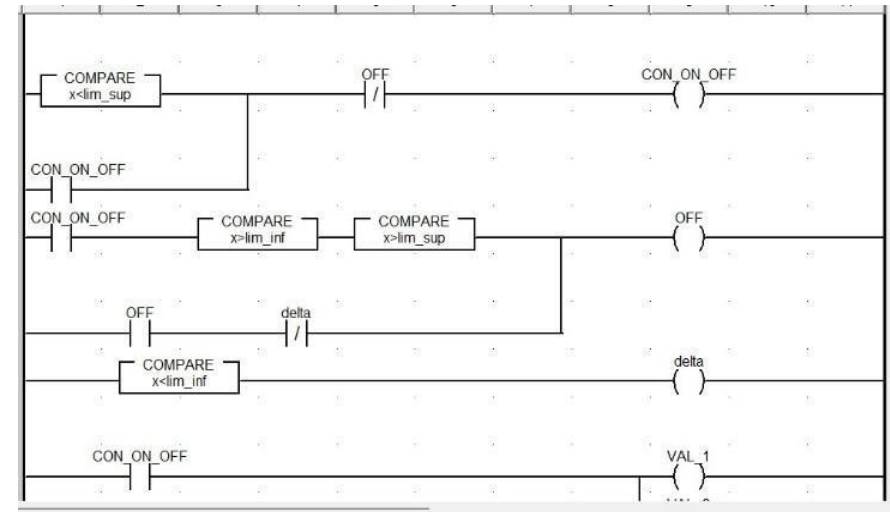
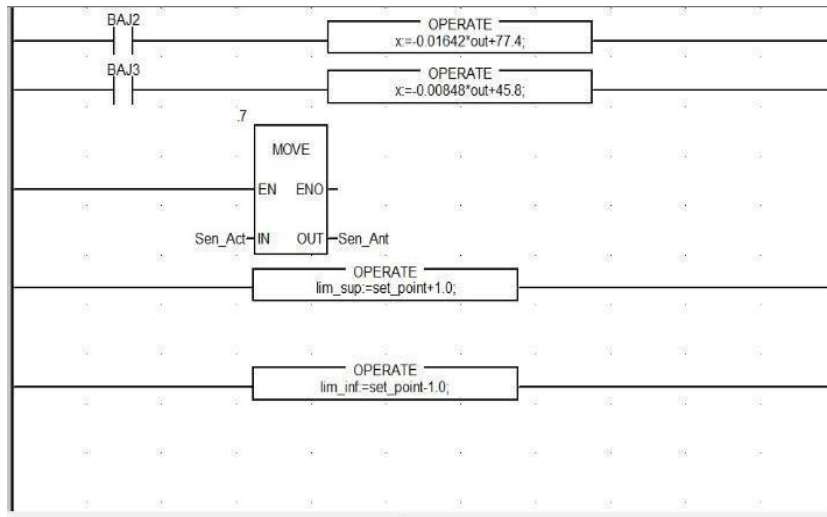
- Capturas de pantalla de la programación realizada en Unity Pro S.
- Registro de observaciones sobre la operación del sistema.

## Bibliografía

- [1] T. Urica, P. Sojka, D. Koniar y A. S. L. Hargas, «The Control Process of an On-off Controller,» 29 July 2019.
- [2] instrumentacionycontrol, «Control ON/OFF o Todo/Nad,» 2025.
- [3] O. Moriwaki, K. Noguchi, H. Takahashi, T. Sakamoto, K.-i. Sato y H. Hasegawa, «Terabit-scale compact hierarchical optical cross-connect system employing PLC devices and optical backplane,» 25 March 2010.
- [4] J.-F. Li, D.-L. Wu, Y.-J. Wu y G. Zhang, «Dual band-notched UWB MIMO antenna,» 03 July 2015.

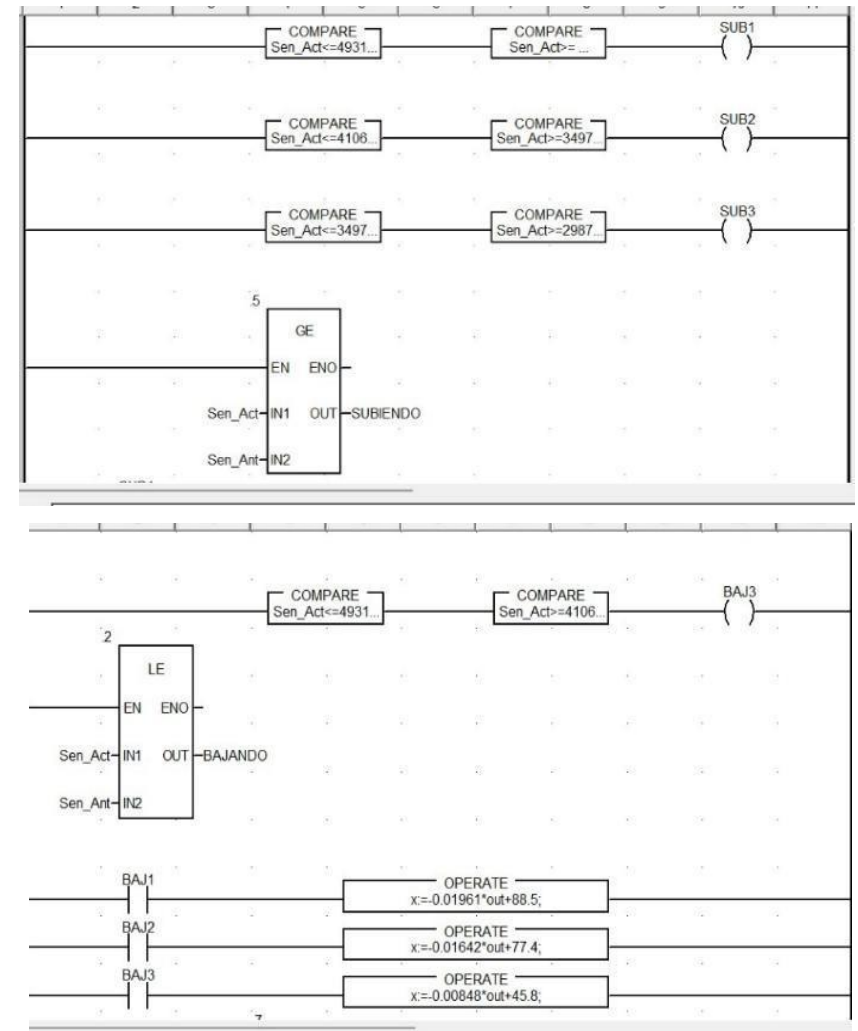
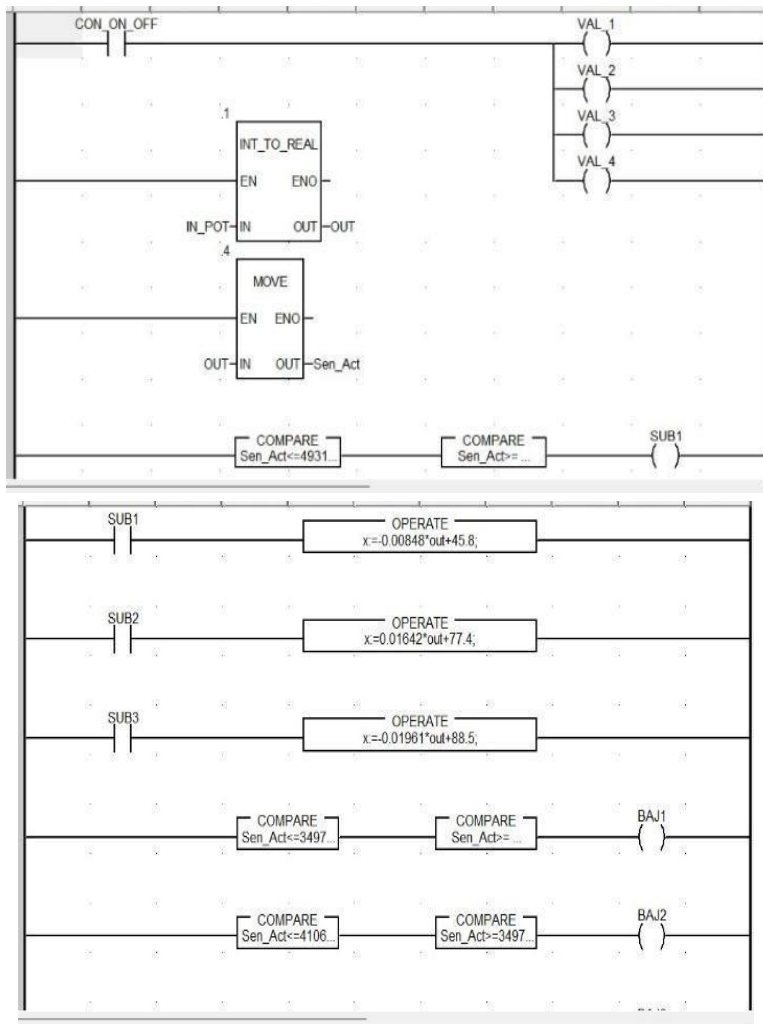
### Anexo 3. Códigos Control ON/OFF

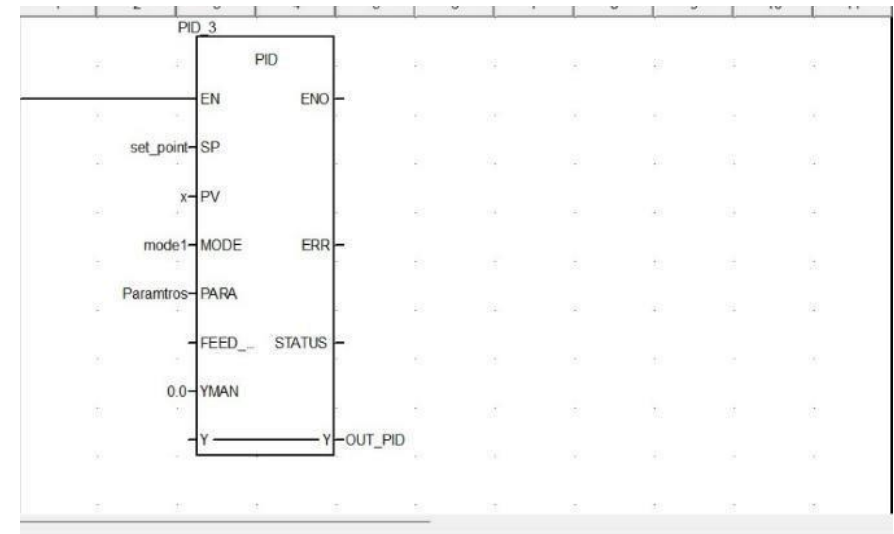
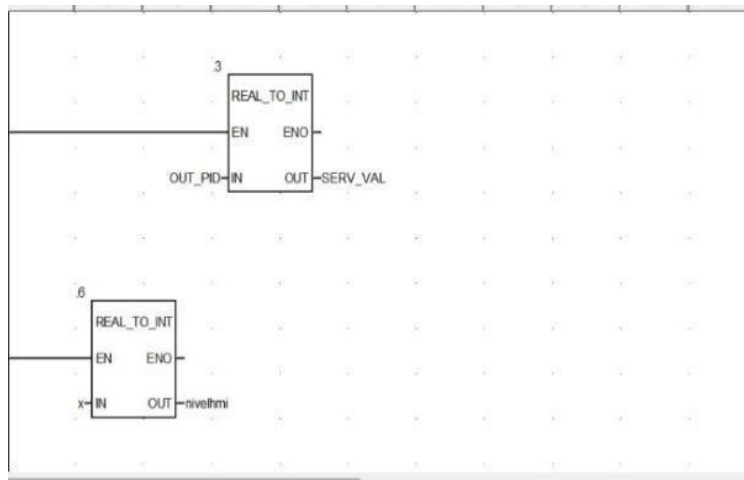
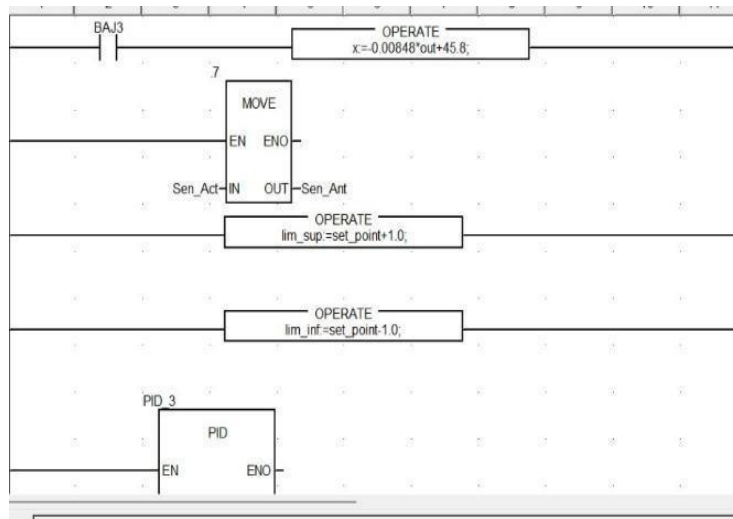




| Nombre      | Valor | Tipo   | Comentario |
|-------------|-------|--------|------------|
| OUT         |       | REAL   |            |
| ALTURA_CM   |       | REAL   |            |
| IN_POT      |       | INT    |            |
| x           |       | REAL   |            |
| set_point   |       | REAL   |            |
| lim_inf     |       | REAL   |            |
| lim_sup     |       | REAL   |            |
| Y           |       | REAL   |            |
| Sen_Act     |       | REAL   |            |
| VAL 1       |       | EBBOOL |            |
| VAL 2       |       | EBBOOL |            |
| CON_ON_OFF  |       | BOOL   |            |
| plan_on     |       | BOOL   |            |
| plan_off    |       | BOOL   |            |
| interruptor |       | EBBOOL |            |
| RESET2      |       | EBBOOL |            |
| Y2          |       | REAL   |            |
| SERV_VAL    |       | EBBOOL |            |
| Sen_Act     |       | REAL   |            |
| Sen_Ant     |       | REAL   |            |

#### Anexo 4. Códigos Control PID



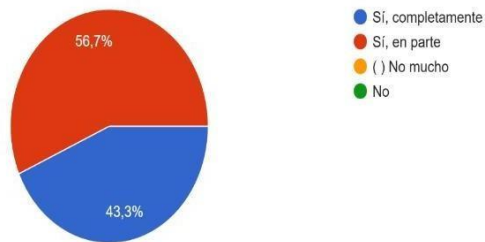


| Nombre      | Valor | Tipo     | Comentarios |
|-------------|-------|----------|-------------|
| OUT         |       | REAL     |             |
| ALTURA_CM   |       | REAL     |             |
| IN_POT      |       | INT      |             |
| x           |       | REAL     |             |
| set_point   |       | REAL     |             |
| lim_inf     |       | REAL     |             |
| lim_sup     |       | REAL     |             |
| Y           |       | REAL     |             |
| Sen_Act     |       | REAL     |             |
| VAL_1       |       | EBOOL    |             |
| VAL_2       |       | EBOOL    |             |
| CON_ON_OFF  |       | BOOL     |             |
| plan_on     |       | BOOL     |             |
| plan_off    |       | BOOL     |             |
| interruptor |       | EBOOL    |             |
| RESET2      |       | EBOOL    |             |
| SERV_VAL    |       | INT      |             |
| Sen_Act     |       | REAL     |             |
| Sen_Ant     |       | REAL     |             |
| mode1       |       | Mode_PID |             |
| Paramtros   |       | Para_PID |             |
| gain        |       | REAL     |             |
| ti          |       | TIME     |             |
| td          |       | TIME     |             |
| ti_lim      |       | TIME     |             |
| yman        |       | REAL     |             |
| yman        |       | REAL     |             |

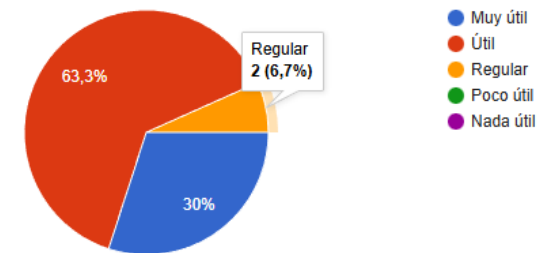
## Anexo 5. Encuestas

Resumen general de encuestas: en la encuesta de la guía de Control PID participaron 30 estudiantes; el 86% calificó la claridad de la guía como muy buena, el 56% indicó que la guía facilitó la comprensión total en parte, el 93.3% consideró la práctica en Unity Pro S como útil o muy útil y el 53.3% sugirió incluir más ejemplos prácticos. En la encuesta de la guía de control ON/OFF participaron 12 estudiantes; el 83.4% manifestó que los pasos para realizar el código en lenguaje Ladder fueron fáciles o muy fáciles, el 100% afirmó entender el funcionamiento del control ON/OFF, el 91.6% se sintió capaz de implementar este control en otros sistemas y el 58.3% reconoció que aún requeriría apoyo. Edades de los participantes: Pendiente por completar.

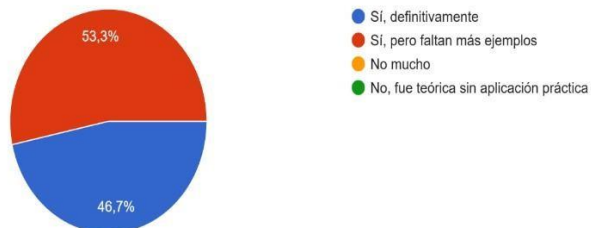
¿Consideras que la guía te ayudó a comprender cómo funciona y se implementa un control PID?  
30 respuestas



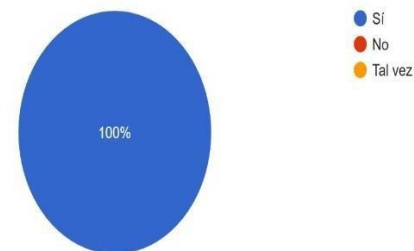
¿Qué tan útil encontraste la práctica en Unity Pro S para aplicar el control PID?  
30 respuestas



¿Sentiste que la guía incluía ejemplos y explicaciones suficientes para aplicar lo aprendido en un entorno real?  
30 respuestas

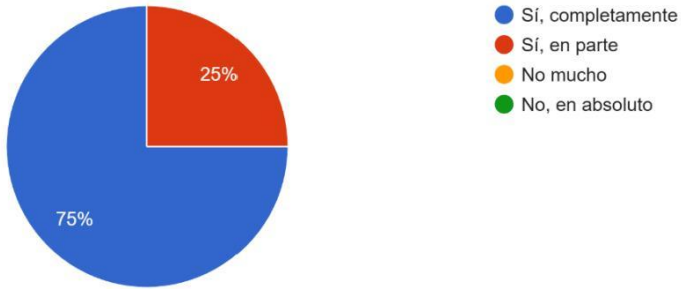


Después de realizar la guía, ¿sientes que entendiste cómo funciona un control ON/OFF?  
12 respuestas



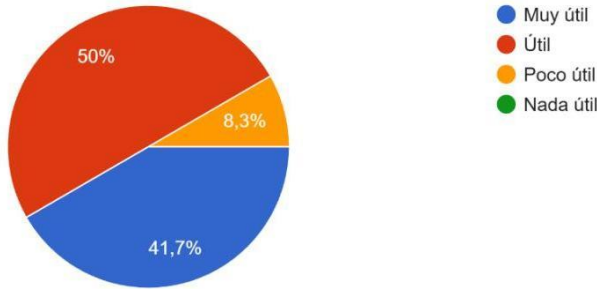
¿Los ejemplos utilizados te ayudaron a entender mejor el control ON/OFF?

12 respuestas



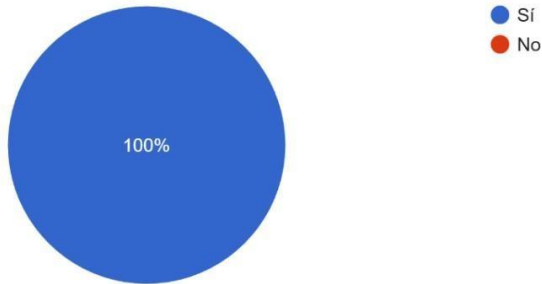
En general, ¿qué tan útil te pareció la guía?

12 respuestas



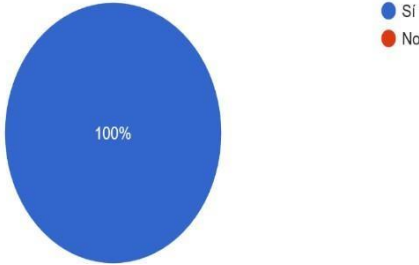
¿Te gustaría que se incluyeran más ejemplos prácticos?

12 respuestas



¿Consideras que las explicaciones teórico-prácticas fueron suficientes para entender el tema?

12 respuestas



¿Cómo calificarías tu satisfacción general con la guía?  
12 respuestas

