



Desarrollo de estrategias de control clásico en la estación de entrenamiento industrial

Lita Alvarado, Bryan Stalin y Maza Girón, Jessica Alejandra

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Automatización

Ing. Guamán Novillo, Ana Verónica PhD

28 de Febrero del 202



Plagiarism and AI Content Detection Report

TesisV270224.pdf



ENI VERONICA GUAMAN
ROVILLO

Scan details

Scan time:
February 27th, 2024 at 20:6 UTC

Total Pages:
87

Total Words:
21515

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.9%	197
Minor Changes	0.1%	32
Paraphrased	2.8%	506
Omitted Words	3%	652

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	0%	0
Human text	100%	20863

[Learn more](#)



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "Desarrollo de estrategias de control clásico en la estación de entrenamiento industrial" fue realizado por los señores Lita Alvarado, Bryan Stalin y Maza Girón, Jessica Alejandra, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de febrero de 2024



.....
Ing. Ana Verónica Guamán Novillo PH. D

C. C. 1103996946



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Lita Alvarado, Bryan Stalin y Maza Girón, Jessica Alejandra, con cédulas de ciudadanía N° 1751223254 y N° 1104312127, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: "Desarrollo de estrategias de control clásico en la estación de **entrenamiento industrial**" es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 28 de febrero del 2024

.....
Lita Alvarado Bryan Stalin

C.C.: 1751223254

.....
Maza Girón, Jessica Alejandra

C.C.: 1104312127



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Autorización de Publicación

Nosotros Lita Alvarado, Bryan Stalin y Maza Girón, Jessica Alejandra con cédulas de ciudadanía N° 1751223254 y N° 1104312127, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "Desarrollo de estrategias de control clásico en la estación de entrenamiento industrial" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 28 de febrero del 2024

Lita Alvarado Bryan Stalin

C.C.: 1751223254

Maza Girón, Jessica Alejandra

C.C.: 1104312127

Dedicatoria

El presente proyecto de titulación se lo dedico completamente a mis padres Manuel y Blanca, quienes con su ayuda, apoyo y amor incondicional han estado siempre presente en todo el largo trayecto de la carrera universitaria, dándome las fuerzas y ánimo necesario para no rendirme sin cumplir mis metas, llegando a realizar grandes sacrificios por llegar a ver a su hijo siendo un gran profesional e inculcando a tomar las mejores decisiones como persona.

A mi hijo Maty que con solo el hecho de su existencia ha sido el motor de mi vida para salir adelante, forjando un carácter fuerte y actitudes de nunca rendirse por el simple hecho de hacerlo sentir orgulloso de su padre y con el pensamiento de trasmitirle la idea que con esfuerzo todo el posible.

A mi hermano Jhonatan por el apoyo incondicional, nunca dejándome solo y sobre todo por estar siempre pendiente de mi avance profesional, al mantenerme con el pensamiento que juntos debemos lograr a ser unos grandes profesionales por nuestros padres.

Por último, se lo dedico a cada uno de mis compañeros con los cuales se ha vivido momentos especiales tanto personal como profesional, compartiendo sus ideas y conocimientos. Espero reencontrarme con cada uno de ellos como colegas y podernos ayudar mutuamente en los momentos difíciles.

Bryan Stalin Lita Alvarado

Dedicatoria

A mi querida abuelita Anita y a mi amada Lunita:

Su amor, lealtad y paz me guiaron en cada paso del camino, enseñándome el valor de la familia, la perseverancia y la bondad. Dedico este proyecto a estos dos seres de luz que iluminaron mi vida con su amor y apoyo incondicional. Este trabajo de titulación es un pequeño homenaje a su memoria. Mis triunfos son también de ustedes, y estoy segura de que seguirán acompañándome en cada paso que dé en la vida. Con infinito amor y eterna gratitud.

Jessica Alejandra Maza Girón

Agradecimiento

En primer lugar, le doy gracias a Dios por darme la vida, por permitirme alcanzar este logro junto de la compañía de mis padres, dándome la salud y las fuerzas necesarias para no rendirme, siempre guiándome y cuidándome en todas las decisiones y acciones que he tomado.

Un fraterno agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" por permitirme haber sido parte de su grandeza, forjando profesionales de calidad con la ayuda de sus docentes que antes de profesionales son personas que siempre están presentes para darnos consejos y lecciones de vida. Y sobre todo un agradecimiento especial a la Ing. Ana Guamán por el conocimiento compartido en cada clase, por los consejos y ayuda en cualquier problema, motivándonos a salir adelante.

A mis padres por la lucha incansable que dieron día a día para que no me faltara nada en el transcurso de la carrera, logrando así cumplir esta meta. Las palabras quedarán cortas para expresar lo agradecido que estoy que ustedes sean mis padres al brindarme el amor necesario en todo el largo camino que he recorrido.

Gracias a cada uno de mis compañeros y amigos por cada momento vivido en este largo viaje de la carrera universitaria, por los trabajos grupales, salidas y comidas juntos. Y gracias especialmente a Jessy por ser una excelente compañera de proyecto, por su tiempo y paciencia, pero sobre todo gracias por los momentos de diversión, de apoyo y consejos. Gracias por tu amistad.

Bryan Stalin Lita Alvarado

Agradecimiento

Al cabo de este arduo periodo de estudio y dedicación, me embarga un profundo sentimiento de gratitud hacia quienes me acompañaron y brindaron su invaluable apoyo en mi desarrollo académico y personal.

A mi madre, Sandra, quien ha sido mi fuente de inspiración en cada momento. A mi hermano Bryan, mi abuelita Anita y mis queridos tía Rosita y tío Santos, les agradezco de todo corazón por su apoyo incondicional y por haber sido como segundos padres para mí. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable que ha enriquecido mi camino en cada paso.

A Lunita, por todos estos años de alegría compartida, gracias por ser la mejor medicina para el alma. Tu recuerdo siempre permanecerá vivo en mí.

A Dieguito, mi compañero de vida, por tu amor y apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Tu presencia ha sido un baluarte en mi camino, impulsándome a alcanzar la mejor versión de mí misma.

A mi gran amigo, Bryan, con quien hemos conformado este equipo de trabajo. Gracias, Bryan, por ser mucho más que un compañero del proyecto de titulación, por ser un amigo excepcional, tu dedicación y conocimiento han enriquecido enormemente este proceso.

A los docentes de IELA, por su conocimiento compartido. En especial, deseo reconocer la invaluable orientación brindada por la Ing. Anita Guamán, quien es un verdadero ejemplo de vocación y compromiso con la educación.

Gracias a todos por formar parte de este camino y por su apoyo incondicional.

Jessica Alejandra Maza Girón

Índice de Contenido

Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Índice de Contenido.....	10
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras.....	19
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Capítulo I. Introducción.....	24
Antecedentes.....	24
Justificación	25
Objetivos.....	26
Objetivo General	26

Objetivos Específicos	26
Alcance del Proyecto	27
Capítulo II. Marco Teórico	30
Sistemas de Control.....	30
Hardware de un sistema de control	31
Diseño de un sistema de control	37
Estrategias de Control de Procesos.....	39
Caracterización de Lazos de Control.....	39
Estrategia de control en cascada.....	41
Estrategia de control de alimentación adelantada (Feedforward)	42
Estrategia de control de Relación.....	43
Estrategia de control Override	44
Técnicas de Control	45
Modelamiento de la Planta.....	47
Técnicas de Sintonización del Controlador	48
HMI.....	50

Control de Potencia en Sistemas de Calefacción Eléctrica	51
Control de ángulo de disparo.....	51
Detector de cruce por cero	51
Modulación de ancho de pulso PWM	52
Comparación de las técnicas de control de potencia	52
Capítulo III. Desarrollo e Implementación	54
Estación de Procesos CTN-1	54
Ingeniería Conceptual.....	56
Proceso 1: Variable de Nivel	57
Proceso 2: Variable de Temperatura	59
Ingeniería Básica y de Detalle.....	62
Componentes Mecánicos	62
Componentes Eléctricos.....	63
Implementación del Hardware de la estación de procesos CTN-1	70
Fase de Control de Potencia de la Niquelina	85
Modelamiento de las Plantas de la Estación de Procesos CTN-1.....	92

Sintonización de las Plantas de la Estación de Procesos CTN-1	100
Diseño de las pantallas de HMI	111
Puesta en Marcha.....	116
Capítulo IV. Pruebas y Resultados	121
Pruebas de Conectividad	121
Pruebas con PLC – Computador	121
Pruebas con PLC – Instrumentos de medición y actuación	122
Pruebas con PLC – HMI.....	123
Pruebas de Funcionamiento	124
Pruebas de funcionamiento del Control de Potencia	124
Pruebas de Medición de Temperatura.....	126
Pruebas de Medición de Caudal.....	127
Pruebas de Medición de Nivel	128
Prueba de funcionamiento Control de Temperatura	129
Prueba de funcionamiento Control de Nivel.....	130
Estrategias de Control en la Estación de Procesos CTN-1	132

Estrategia de Control en Cascada en el Proceso 1	132
Estrategias de Control Selectivo.....	135
Guías de Laboratorio	136
Guía Laboratorio 1	136
Guía Laboratorio 2	139
Guía Laboratorio 3	142
Plan de Mantenimiento	143
Reconocer los equipos de la estación de procesos	143
Definir las tareas del mantenimiento.....	143
Instructivo para el plan de mantenimiento	144
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones	145
Conclusiones	145
Recomendaciones	148
Trabajos Futuros.....	148
Capítulo V. Bibliografía.....	149

Índice de Tablas

Tabla 1	Dispositivos de medición de temperatura industriales	33
Tabla 2	Dispositivos de medición de caudal industriales	34
Tabla 3	Dispositivos de medición de nivel industriales	35
Tabla 4	Elementos de Control Final	36
Tabla 5	Pasos del Diseño del Sistema de Control.....	38
Tabla 6	Acción de Control Proporcional, Derivativo e Integral.....	46
Tabla 7	Técnicas para obtener el modelo matemático de un sistema de control.....	47
Tabla 8	Efectos de la variación de los parámetros del controlador PID	49
Tabla 9	Métodos de Control de Potencia en Sistemas de Calefacción.....	53
Tabla 10	Descripción técnica de los tanques de la estación de proceso CTN-1.....	62
Tabla 11	Matriz de evaluación de los componentes de la estación	64
Tabla 12	Matriz de evaluación de los componentes de la estación	65
Tabla 13	Acciones para poner en modo operativo los componentes.....	66
Tabla 14	Especificaciones técnicas de los elementos de medición	68
Tabla 15	Descripción técnica de los actuadores de la estación de proceso CTN-1	69

Tabla 16	Parámetros básicos de configuración.....	73
Tabla 17	Parámetros de configuración.....	74
Tabla 18	Configuración de parámetros variador Invertek Drivers	76
Tabla 19	Listado de elementos para entradas del controlador	77
Tabla 20	Listado de elementos para salidas del controlador.....	78
Tabla 21	Descripción técnica del controlador y módulos de expansión	78
Tabla 22	Tabla de asignación de recursos de tipo Salidas Digitales	80
Tabla 23	Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Digitales.....	81
Tabla 24	Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Analógicas	82
Tabla 25	Características técnicas para la elección del relé de estado sólido.....	86
Tabla 26	Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Analógicas	91
Tabla 27	Plantas de la estación CTN-1	94
Tabla 28	Variación de estimaciones del modelo de la planta de nivel	96
Tabla 29	Variación de estimaciones del modelo de la planta de caudal	97
Tabla 30	Variación de estimaciones del modelo de la planta de temperatura	99
Tabla 31	Resultados de Modelamiento de la Planta de nivel, caudal y temperatura. ...	99

Tabla 32	Criterios de Diseño para el control de la planta de temperatura	100
Tabla 33	Comportamiento de planta de temperatura en lazo cerrado sin controlador	101
Tabla 34	Parámetros de las técnicas de control de Temperatura.....	102
Tabla 35	Comportamiento de planta de temperatura	103
Tabla 36	Valores de los parámetros del controlador	104
Tabla 37	Criterios de Diseño para el control de la planta de nivel	104
Tabla 38	Comportamiento de planta de nivel en lazo cerrado sin controlador.....	105
Tabla 39	Parámetros de las técnicas de control de nivel.....	106
Tabla 40	Comportamiento de planta de nivel en estado estacionario y transitorio	107
Tabla 41	Valores de los parámetros del controlador nivel al PLC Micrologix 1100.....	108
Tabla 42	Criterios de Diseño para el control de la planta de caudal	108
Tabla 43	Comportamiento de planta de caudal en lazo cerrado sin controlador.....	109
Tabla 44	Parámetros de las técnicas de control de caudal.....	110
Tabla 45	Comportamiento de planta de caudal en estado estacionario y transitorio ..	111
Tabla 46	Ciclo de trabajo y tiempo de conmutación necesaria.....	125
Tabla 47	Pruebas de medición de temperatura.....	126

Tabla 48	Pruebas de Medición de Caudal.....	127
Tabla 49	Pruebas de medición de nivel.....	128
Tabla 50	Comparación de las técnicas de control	130
Tabla 51	Comparación de las técnicas de control en la variable de nivel	131
Tabla 52	Hardware para la estrategia de control en cascada.....	134
Tabla 53	Hardware para la implementación de estrategia de control selectivo.....	136
Tabla 54	Cuestionario de evaluación de la guía de laboratorio 1	137
Tabla 55	Análisis de resultados de cada pregunta planteada.....	138
Tabla 56	Cuestionario de evaluación de la guía de laboratorio 1	140
Tabla 57	Análisis de resultados de cada pregunta planteada.....	141

Índice de Figuras

Figura 1	Variables de un lazo de control.....	39
Figura 2	Diagrama de bloques de la estrategia de control en cascada	42
Figura 3	Esquema de la estrategia de control de relación.....	43
Figura 4	Control Override.	44
Figura 5	Sistema de control en lazo cerrado con control PID.....	45
Figura 6	Ciclo de vida de una HMI.....	50
Figura 7	Ejemplos de Modulación de ancho de pulso	52
Figura 8	Estructura de la Estación de Procesos CTN-1	55
Figura 9	Diagrama de bloques del sistema de entrenamiento	56
Figura 10	Proceso 1 de la Estación de Procesos CTN-1	57
Figura 11	Tareas del Proceso 1.....	59
Figura 12	Proceso 2 de la Estación de Procesos CTN-1	60
Figura 13	Tareas del Proceso 2.....	61
Figura 14	Conexión eléctrica del sensor ultrasónico Relfex RVT	71
Figura 15	Conexiones de control y de potencia	75

Figura 16	Grafcet estructurado para la programación	83
Figura 17	Programación del Grafcet de Paro Fin de Ciclo	84
Figura 18	Diagrama de conexión del hardware del control de potencia	87
Figura 19	Generación del Pulsos PWM con dos temporizadores.....	89
Figura 20	Diagrama de flujo de la lógica de programación para PWM.....	90
Figura 21	Subrutina para la generación de pulsos PWM	92
Figura 22	Programación por bloques en Simulink.....	94
Figura 23	Respuesta a Escalón de la planta de nivel.....	95
Figura 24	Respuesta a Escalón de la planta de caudal	97
Figura 25	Respuesta a Escalón de la planta de temperatura.....	98
Figura 27	Simulación del comportamiento de la planta de temperatura	102
Figura 28	Simulación del sistema en lazo cerrado de la planta de nivel.....	105
Figura 29	Simulación del Comportamiento de la planta de Nivel	106
Figura 31	Simulación del comportamiento de la planta de caudal.....	110
Figura 32	Diagrama de navegación de pantallas HMI.....	112
Figura 33	Pantalla de inicio de usuario	113

Figura 34	Pantalla Principal del Sistema de Entrenamiento.....	114
Figura 35	Pantalla de control de nivel.....	115
Figura 36	Pantalla de control de temperatura	116
Figura 37	Conexión de las entradas, módulos y salidas del PLC.....	117
Figura 38	Funcionamiento visto desde la interfaz HMI.....	118
Figura 39	Pantalla de control de temperatura	119
Figura 40	Lectura de variables del sistema de entrenamiento	120
Figura 41	Prueba de conectividad entre PLC y Computador	121
Figura 42	Prueba con la comunicación con los dispositivos de medición.....	122
Figura 44	Respuesta de la Planta de Temperatura con los diferentes controladores.	129
Figura 45	Respuesta de la Planta de Nivel con los diferentes controladores	131
Figura 46	Estrategia de Control en Cascada en el Proceso 1	133
Figura 47	Estrategia de control selectivo en el tanque de reserva	135

Resumen

El presente trabajo de la Unidad de Integración Curricular tiene como objetivo el desarrollar control clásico en la estación de entrenamiento industrial CTN-1 ubicado en el laboratorio de instrumentación y sensores del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones para el control de nivel, caudal y temperatura, así como el análisis para la implementación de estrategias de control. El proyecto se divide en tres fases para su desarrollo: el estudio preliminar de los equipos industriales instalados en la estación de entrenamiento; el diseño e implementación de la fase de control de potencia para el lazo de control de temperatura, la instalación y configuración de los equipos industriales para el lazo de nivel (driver de frecuencia y sensor ultrasónico), modelamiento de los lazos de control, la sintonización y el ajuste fino de los controladores. Finalmente, el trabajo concluye con la puesta en marcha, evaluaciones, análisis y resultados.

La estación de control de procesos CTN-1 tiene como finalidad de cumplir con las necesidades teóricas y prácticas para el desarrollo de las habilidades de los estudiantes de la carrera de Electrónica y Automatización en el área de Instrumentación industrial y Control de Procesos, para lo cual se implementan tres guías de laboratorio, manual de instrucciones para el modelamiento y sintonización de lazos de control, propuesta de un plan de mantenimiento y el análisis para la implementación de estrategias de control de cascada y override para futuros trabajos.

Palabras clave: Control clásico, estación de entrenamiento industrial, control de potencia y estrategias de control.

Abstract

The objective of the present work of the curricular integration unit is to develop a classical control for the Industrial Training Station CTN-1 located in the instrumentation and sensors laboratory of the Department of Electrical, Electronics and Telecommunication, for the control of level, flow and temperature, as well as the analysis for the implementation of control strategies. This project is divided into 3 phases for its development: preliminary study of industrial equipment installed in the training station; the design and implementation of the power control phase for the temperature control loop, the installation and configuration of the industrial equipment for the level loop (frequency driver and ultrasonic sensor), modeling of the control loops, tuning and fine adjustment of the controllers. Finally, the work concludes with the deployment, evaluations, analysis and results.

The process control station CTN-1 focus on satisfy theoretical and practical needs for the development of Electronics and Automatization students' skills in the area of Industrial Instrumentation and Process Control, for which, the following have been implemented: three laboratory guides, an instruction manual for modeling and tuning control loops, a proposal of a maintenance plan and an analysis for the implementation of cascade and override control strategies for future work.

Keywords: Classical control, industrial training station, power control and control strategies.

Capítulo I. Introducción

Antecedentes

La industria ecuatoriana en los últimos años ha experimentado una serie de cambios en el área de la automatización, debido a las tendencias en el desarrollo de la gestión de materia prima, técnicas de producción, el ahorro energético y la tendencia en la mejora de la eficiencia, eficacia en el proceso y la calidad del producto. (Bustos, 2017). Por lo tanto, los sistemas de entrenamiento industrial se han convertido en una herramienta clave para la formación de ingenieros en el campo de la automatización industrial. Estos sistemas simulan procesos industriales, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades prácticas en un entorno controlado y seguro.

Este tipo de sistemas de entrenamiento son fundamentales para la familiarización y manipulación de procesos industriales reales en los estudiantes donde se involucren diferentes variables, como se desarrolla en la tesis de Recalde y Sinailin en el 2023 donde el proyecto permite tener un acercamiento con la instrumentación, el control y la comunicación de equipos y la variable a sensar (caudal) (Recalde & Sinailin, 2023).

Otros trabajos similares desarrollados son el proceso de llenado y tapado para el área de medicamentos líquidos de Lamosan (Gordillo, 2019), estación FMS 201 (Muñoz, 2020), sistema de entrenamiento de bombas centrífugas (Salazar, 2017). Estos proyectos de titulación repotencian las estaciones por averías en los actuadores e implementar el uso en prácticas a las nuevas generaciones de estudiantes.

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, DEEL, cuenta con una estación llamada “sistema de entrenamiento industrial para el aprendizaje profesionalizante de los estudiantes” en el laboratorio de instrumentación y sensores, el cual permite el desarrollo de

habilidades en el manejo de sistemas instrumentados. Dicha estación ha sido repotenciada en la tesis de Víctor Moya en el 2022, el cual cuenta con tres tanques (reserva, nivel y temperatura) acoplados entre sí mediante tuberías. En este trabajo de tesis, se diseñó un sistema de entrenamiento industrial que se caracteriza por su modularidad, robustez y flexibilidad. Además, que permite llevar a cabo la caracterización y calibración de sensores utilizados en la industria, simulación de procesos básicos de funcionamiento en la industria y control de proceso On-Off y on-off con histéresis, permitiendo el control de nivel y medición de caudal, temperatura por medio de la manipulación de motor, electroválvulas y niquelina (Moya, 2022). Sin embargo, hasta el momento no es posible realizar control de procesos utilizando control clásico porque los actuadores requieren mejoras en la activación.

Tomando en cuenta los antecedentes mencionados, el presente trabajo de titulación se enfoca en el desarrollo de control de procesos en el sistema de entrenamiento donde se puedan implementar, sistemas en lazo abierto y cerrado. El desarrollar lazos de control clásico para los sistemas de entrenamiento industrial del laboratorio de instrumentación y sensores, que permitan a los estudiantes adquirir habilidades prácticas avanzadas en el control de procesos industriales. Estas técnicas de control deben ser diseñadas de manera que sean fáciles de entender y de implementar para los estudiantes.

Justificación

Uno de sus objetivos específicos de la carrera de Electrónica y Automatización es “Desarrollar capacidades para aplicar metodologías científicas, teóricas y técnico-instrumentales, que utilicen el pensamiento matemático en el modelado, análisis, diseño e implementación de sistemas eléctricos, electrónicos, de control clásico y moderno y automatizados, integrando los saberes y experiencias interculturales”. Por lo tanto, el desarrollo de lazos de control clásico en la estación de entrenamiento industrial para el aprendizaje y

avance académico de los estudiantes es importante para el cumplimiento del perfil de egreso de los estudiantes.

Los sistemas de entrenamiento industrial, actualmente, son una herramienta fundamental para la formación de profesionales en este campo y es importante que estos sistemas cuenten con lazos de control actualizados y eficientes. La industria ecuatoriana se encuentra en constante evolución y actualización, por ello, es esencial que los estudiantes tengan capacidad teórico-prácticos. Por ello, el desarrollo de los lazos de control clásico en el sistema de entrenamiento industrial del laboratorio de instrumentación y sensores dará lugar a una mejora en la calidad de la formación que reciben los estudiantes de la carrera, en el campo de la electrónica y la automatización.

Esto se pretende que mejore la calidad de la formación que reciben los actuales y futuros estudiantes de las asignaturas de instrumentación industrial y control de procesos.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar estrategias de control clásico en la estación de entrenamiento industrial.

Objetivos Específicos

- Realizar la ingeniería conceptual para el control clásico de la estación de entrenamiento industrial.
- Diseñar e implementar la fase de potencia para la activación de la niquelina del tanque de temperatura (pre-actuador).

- Identificar las plantas de cada uno de los tanques en función de su variable de proceso principal (nivel, temperatura y caudal).
- Diseñar e implementar los lazos de control On/Off, P, PI y PID según corresponda para la operación de los lazos de control.
- Diseñar las interfaces de control (HMI) utilizando normativas para el control de la estación de entrenamiento industrial.
- Analizar los resultados de los diferentes lazos de control de la estación de entrenamiento industrial.
- Elaborar la documentación del trabajo realizado incluyendo diagramas eléctricos del tablero, diagramas P&ID, graficet.
- Desarrollar Guías de Laboratorio para el uso académico de la estación de entrenamiento.

Alcance del Proyecto

El presente trabajo de titulación pretende desarrollar lazos de control clásico en la estación de entrenamiento industrial del laboratorio de instrumentación y sensores, con el fin de elaborar guías de Laboratorio de las asignaturas profesionalizantes como instrumentación industrial, y control de procesos para el uso académico de la estación de entrenamiento.

La estación donde se encuentra el control de nivel, temperatura y caudal está compuesto por un tanque de reserva que interactúan entre sí con los demás tanques por medio de tuberías y válvulas, además de contar con sensores de temperatura, nivel, una bomba centrífuga que realiza la circulación del líquido entre los tanques.

El propósito central de este trabajo de titulación es desarrollar técnicas de control clásico en la estación de entrenamiento industrial. Para lograr este objetivo, se llevará a cabo el diseño e implementación de la fase de potencia destinada a la activación de la niquelina en el tanque de temperatura. Además, se contempla la elaboración e integración de un módulo de variador de frecuencia, junto con su acoplamiento a la bomba centrífuga de la planta. Con estos avances, se busca dotar al DEEL con un sistema de entrenamiento que posea la capacidad de implementar procesos de control clásico.

El presente trabajo de titulación pretende desarrollar los lazos de control clásico en la estación de entrenamiento industrial del Laboratorio de instrumentación y sensores, dividido en tres fases, la primera corresponde al estudio de los equipos instalados en la estación de entrenamiento, en la segunda fase se lleva a cabo el diseño e implementación de los lazos de control, finalmente en la fase tres su respectiva validación, análisis y resultados. Para el desarrollo de las fases antes descritas, el documento se divide en cinco capítulos descritos a continuación:

Capítulo II. Establece el marco conceptual del tema de titulación, proporcionando una base teórica del tema.

Capítulo III. Define el uso de la estación de procesos CTN-1 y los lazos de control del proceso 1 y 2. Realiza un análisis exhaustivo del estado actual de la estación de procesos CTN-1. Se aborda el diseño detallado de los lazos de control de las plantas. Además, se presenta el modelamiento de las plantas, el diseño e implementación de la etapa de potencia y variador de frecuencia en los lazos de control.

Capítulo IV. Se presenta las pruebas de conectividad, funcionamiento del sistema, el planteamiento de estrategias de control en la estación de procesos CTN-1, pruebas de

funcionamiento del control de potencia, las guías de laboratorio y el plan de mantenimiento para la estación de entrenamiento.

Capítulo V. Al cierre del documento, se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo de este trabajo, abriendo la puerta a futuras investigaciones y proyectos subsiguientes.

Capítulo II. Marco Teórico

El presente capítulo aborda los conceptos fundamentales para la concepción de los lazos de control del sistema de entrenamiento industrial. El propósito es proporcionar una introducción detallada a la fundamentación teórica necesaria que sustenta el desarrollo integral del mencionado sistema.

Sistemas de Control

Se define como sistemas de control al conjunto de componentes que se encuentran unidos con una determinada finalidad, actuando de manera conjunta. (Adam, 2020) Un sistema de control presenta tres tareas principales como:

- Monitoreo de variables
- La toma de decisiones dependiendo de la información obtenida en tiempo real del sistema que se esté controlando. (Adam, 2020)
- Implementación eficiencia sobre el proceso.

El sistema de control se divide en sistema de control manual y sistema de control automático.

- Sistema de control manual: Las tareas se llevan a cabo manualmente por un operador humano. (Adam, 2020)
- Sistema de control automático: Tareas llevadas a cabo de manera automática por una máquina o computadora. (Adam, 2020)

Los sistemas de control se organizan con los denominados lazos de control, que es el conjunto de componentes interconectados entre sí, trabajando juntos para un objetivo común, ya sea para la medición o para el control de una determinada variable del sistema. (Adam, 2020). Los sistemas de control poseen dos configuraciones, sistema en lazo abierto y lazo cerrado, las cuales se detallan a continuación:

- Configuración en Lazo Abierto: Sistema de control el cual su salida no se realimenta, es decir, no tiene repercusión sobre la acción de control. (Adam, 2020)
- Configuración en Lazo Cerrado: Sistema de control cuya salida sirve para obtener la comparación entre la medición y el valor deseado, obteniendo así la modificación de la salida de control para mantener la variable en el valor deseado. (Adam, 2020)

Hardware de un sistema de control

De acuerdo con Adam, E. 2020 en las configuraciones de un sistema de control son constituidos por distintos elementos de hardware, los cuales se detallan a continuación:

- Planta o Proceso: Representa todo el equipamiento físico que tienen por objetivo realizar una actividad en conjunto.
- Elementos de medición y transmisión: El hardware que forma parte de esta sección son los sensores y transductores.
- Sensores: Dispositivos que mide las variables del sistema. (Adam, 2020).

- Transductores: Dispositivos Elementos encargados de acondicionar la señal enviada por el sensor, acondicionas a cantidades físicas. (Adam, 2020).
- Controlador: Dispositivo que tiene a cargo aplicar las leyes de control.
- Elemento de control final: Elementos que implementan las señales de control enviadas por los controladores.

Elementos de Medición y transmisión

En el control automático de procesos, los dispositivos de medición desempeñan un papel crucial. La precisa medición en tiempo real de las variables controladas facilita el cálculo aproximado de las leyes de control, lo que a su vez permite una gestión adecuada de las variables manipuladas para dirigir el proceso hacia el punto de operación deseado.

Los instrumentos de medición se clasifican según la variable que están diseñados para medir y controlar, pueden ser caudal, nivel, presión, temperatura, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, entre otros

Medición de Temperatura

En el ámbito de la medición de temperatura, existe una diversidad de dispositivos disponibles, sin embargo, únicamente algunos han sido adecuadamente adaptados para satisfacer las demandas de los entornos industriales. La Tabla 1 detalla de este tipo, destacando su relevancia en el contexto industrial.

Tabla 1*Dispositivos de medición de temperatura industriales*

Principio	Tipo	Descripción
	Termoresistencias	Medición por medio de la variación en la resistencia eléctrica del metal.
Eléctricos	Termocupla	La variación de la temperatura en la unión genera una variación en el voltaje.
	Termistores	Opera en rangos estrechos con una alta sensibilidad.
Radiación Térmica	Pirómetros ópticos	Medición basada en la radiación que emite la superficie cuya temperatura es medida.
Visuales	Indicador de color	Instrumento de indicación, cuya medición se basa en la propiedad de cambiar el color con la temperatura.

Nota. Esta tabla indica los principales dispositivos en el ámbito de la medición de temperatura.

Recuperado de Elementos de medición y transmisión, Control de procesos por Cesca, Ingaramo & Jeger.

Medición de Caudal

La medición de caudal es un pilar para diversas estrategias y técnicas de control.

(Cesca , Ingaramo, & Jeger, Control de procesos Industriales - Elementos de Medición, 2016)

En la Tabla 2 se detalla los de este tipo.

Tabla 2*Dispositivos de medición de caudal industriales*

Principio de Medición	Principio de Funcionamiento
Velocidad del flujo	Tipo Electromagnético: En líquidos conductivos, basada en la Ley de Faraday, donde se aplica un campo magnético perpendicular al flujo, induciendo una f.e.m. proporcional a la velocidad del fluido.
	Tipo Vortex: Un eje expuesto al flujo de fluido genera remolinos con una frecuencia proporcional a la velocidad de la corriente.
	Tipo Ultrasónico: Posee un emisor de ondas ultrasónicas y un receptor de eco. Basado en efecto Doppler.
	Tipo Turbina: Formado por una turbina la cual gira en velocidad proporcional a la velocidad del fluido.
Presión diferencial	Se reduce la sección transversal del flujo, lo que crea un diferencial de presión proporcional al cuadrado del caudal volumétrico.
Desplazamiento Positivo	Aprovecha la energía del fluido para accionar las partes mecánicas, generando desplazamientos.

Nota. Esta tabla indica los principales dispositivos en el ámbito de la medición de caudal cuyo principio general de medición. Recuperado de Elementos de medición y transmisión, Control de procesos por Cesca, Ingaramo & Jeger.

Medición de Nivel

El término nivel viene determinado como la posición de la interface entre líquido, gas, sólido y la combinación posible entre ellas, por ejemplo: líquido – líquido, sólido – gas. En la Tabla 3 se presenta los dispositivos de medición industriales para esta variable.

Tabla 3

Dispositivos de medición de nivel industriales

Principio General	Principio de Funcionamiento
Ultrasónicos	El emisor de ondas ultrasónicas las propaga hasta el inicio de la interface, donde es reglado y el receptor capta el eco. En base al tiempo entre la emisión y recepción se determina el nivel.
Hidrostático	El nivel es definido en base a la presión atmosférica generada por el peso de una columna.
Flotante	Formado por un flotador en el entorno donde se analiza la interface, donde su variación cambia la posición del flotador.
Boyante	Formado por una boya cuya posición varía según el movimiento generador por la interface. Para sistemas con interface líquido – líquido.

Nota. Esta tabla indica los principales dispositivos en el ámbito de la medición de nivel.

Recuperado de Elementos de medición y transmisión, Control de procesos por Cesca, Ingaramo & Jeger.

Elementos de Control Final

Un elemento final de control es un dispositivo que ajusta la variable manipulada en respuesta a la señal del controlador automático. Por lo general, recibe una señal del controlador y regula el flujo de material o energía en el proceso. (Carvajal Pérez & Contreras Campos, 2016)

Existen dos mecanismos para regular el flujo de fluidos en una línea:

- Mecanismo de modificación de la energía entregada al flujo: Elementos como bombas y variadores de velocidad.
- Mecanismo de modificación de la resistencia al paso del fluido: Elementos como válvulas proporcionales.

En la Tabla 4 se presenta los diversos elementos finales de control que se puede tener en el entorno industrial.

Tabla 4

Elementos de Control Final

Elemento	Descripción
Variador de Velocidad	Ajusta la velocidad de motores, pueden responder a señales de control estándar. Al modificar la velocidad, se puede alterar el flujo impulsado por bombas (para líquidos) y ventiladores (para gases a bajas presiones). (Cesca, Ingaramo, & Vera van Gelderen, Elementos finales de control, 2020)

Elemento	Descripción
Niquelina	Fabricado a base de níquel, para transformar la energía eléctrica en calor. La cantidad de calor producido depende del tiempo de conexión y sigue la ley de Joule (Matango & Portilla, 2016).
Válvula de Control	Controla el flujo de material o energía hacia un proceso ajustando la abertura por la cual el material fluye. (Carvajal Pérez & Contreras Campos, 2016)
Motores Eléctricos	Elemento el cual transforma la energía eléctrica en mecánica mediante la generación de campo magnético. (Carvajal Pérez & Contreras Campos, 2016).
Electroválvulas	Dispositivo electromecánico, cuyo accionamiento se controla mediante la activación de la bobina solenoide. (Matango & Portilla, 2016).

Nota. Esta tabla indica los principales dispositivos en el ámbito de la medición de nivel.

Recuperado de Elementos de medición y transmisión, Control de procesos por Cesca, Ingaramo & Jeger.

Diseño de un sistema de control

El diseño de un sistema de control viene dado por 7 pasos secuenciales, detallados en la Tabla 5, donde se presenta la descripción de cada paso y la acción a realizar en cada uno de ellos. Si el resultado del paso 7, el comportamiento del sistema no cumple con las especificaciones se debe iterar la configuración y el actuador (paso 4). Por otro lado, si cumple se finaliza el diseño.

Tabla 5*Pasos del Diseño del Sistema de Control*

Paso	Descripción
Paso 1: Establecer el objetivo de control	Regulación: La variable controlada deben llegar a un valor deseado. Seguimiento de trayectoria: La variable controlada sigue un comportamiento establecido con anterioridad.
Paso 2: Identificación de variables	Identificar las variables del proceso que afectan el comportamiento del sistema que se desea controlar.
Paso 3: Escribir las especificaciones de las variables	Definir requisitos en: etapa Transitoria (tiempo de establecimiento, overshoot), en la etapa de estado estable (error permitido).
Paso 4: Establecer la configuración del sistema	Establecer la configuración del sistema, cuando la salida no afecta a la acción de control (control en lazo abierto), cuando la salida tiene interferencia en el control (control en lazo cerrado).
Paso 5: Modelo del proceso	Diseñar un controlador que permite alcanzar el objetivo de control.
Paso 6: Describir el controlador y ajuste de parámetros	Seleccionar los parámetros que requiera el controlador para realizar la acción de control.
Paso 7: Optimizar los parámetros	Visualizar el comportamiento de la planta para definir las correcciones de los parámetros seleccionados.

Nota. Esta tabla indica a detalle los pasos a seguir para el diseño del sistema de control.

Estrategias de Control de Procesos

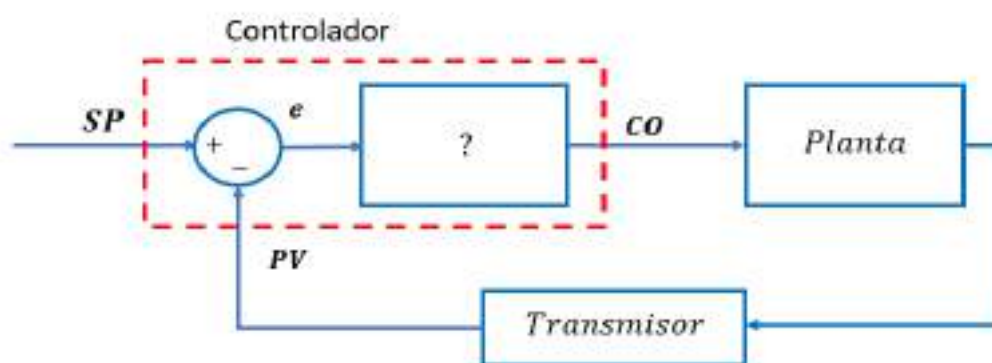
En el vasto campo de la ingeniería de procesos, el control de procesos desempeña un papel fundamental en la optimización, eficiencia y seguridad de las operaciones industriales. Desde la implementación de técnicas simples de control de lazo abierto hasta la sofisticación de métodos avanzados como la cascada, selectivo y retroalimentación, ha habido un continuo desarrollo en la búsqueda de mejorar la capacidad de control y supervisión de sistemas complejos.

Caracterización de Lazos de Control

El esquema de control en retroalimentación simple, como se ilustra en la Figura 1, es comúnmente empleado para regular el comportamiento de las variables en un proceso, las variables de un lazo de control vienen representada en la se describen a continuación.

Figura 1

Variables de un lazo de control



Nota. En la figura se representa la relación de cada una de las variables de los lazos de control, la variable manipulada que es la que se busca mantener controlada según el set point que se indique, mediante el ajuste de la variable manipulada según sea necesario.

- Variable controlada (PV): Variable que se busca mantener o regular dentro de un rango deseado.
- Set point (SP): Constituye el objetivo o valor deseado para la variable controlada.
- Variable manipulada (CO): variable que se ajusta o modifica según sea necesario para mantener en el punto de control la variable controlada.
- Perturbaciones: Factores internos o externos que causan desviaciones de la variable controlada con respecto al set point.
- Parámetros: Variables con valores fijos durante el proceso.

Las estructuras de control convencionales, lazo cerrado y lazo abierto de control, se ven modificados para mejorar el rechazo de perturbaciones, mantenimiento de proporciones, operación con varios controladores, actuadores, objetivos. Estas modificaciones se la denominan técnicas avanzadas de control o estrategias de control, tales como:

- Estrategia de control en Cascada
- Estrategia de control de alimentación adelantada (Feedforward)
- Estrategia de control en relación
- Control Override
- Estrategia de Control de rango partido

Estrategia de control en cascada

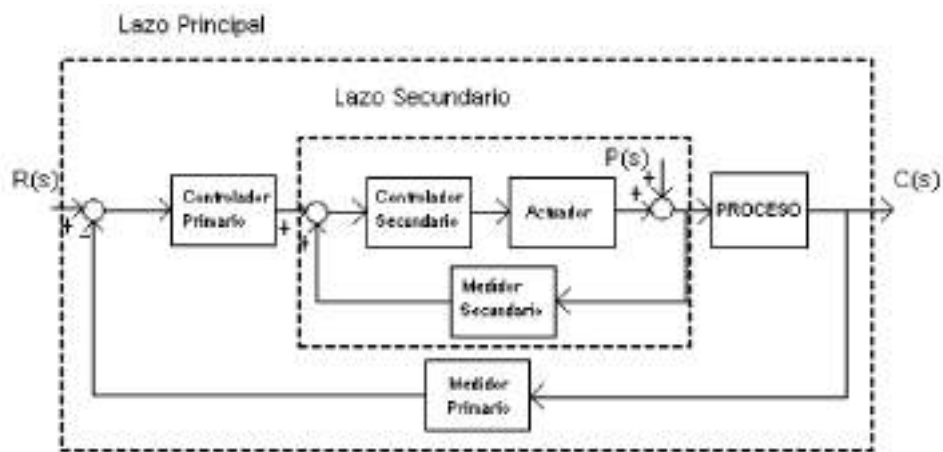
La estrategia de control en cascada se utiliza para la minimización de las perturbaciones internas al lazo de retroalimentación simple, donde se destaca en comparación entre estas dos técnicas:

- La estrategia de control en cascada es capaz de detectar y responder rápidamente a perturbaciones internas dentro del lazo de retroalimentación simple, actuando de manera proactiva en lugar de reaccionar únicamente cuando se observa una variación en la variable controlada.
- Mayor rapidez la estrategia de control en comparación con la estrategia de retroalimentación simple, debido a la acción temprana.
- Inversión económica mayor debido a la adquisición de instrumentación para la estrategia de control.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de bloques de la estrategia de control tipo cascada.

Figura 2

Diagrama de bloques de la estrategia de control en cascada



Nota. En la figura se presenta el diagrama de bloques donde se puede visualizar como implica el uso de una variable manipulada para regular una variable de salida, empleando mediciones de otras variables del sistema. Lo cual implica el diseño de un lazo de control secundario dentro del principal, con el propósito de mitigar las perturbaciones desde su origen. Recuperado de Planta de producción de óxido de etileno, por Pérez, S., Ruiz, O., Gonzáles, V., García, N., Fernández, X., Candela, P. y Bartrolí, A.

Estrategia de control de alimentación adelantada (Feedforward)

El control anticipativo, conocido como control feedforward, se emplea cuando hay perturbaciones que pueden ser medidas, pero no controladas, y que afectan al sistema. En contraste con el esquema de control en cascada, la estrategia de alimentación adelantada se centra en corregir las variaciones de perturbaciones externas al lazo de retroalimentación simple, antes de que estas tengan un impacto en la variable que se está controlando. Con ello se puede resaltar las siguientes características:

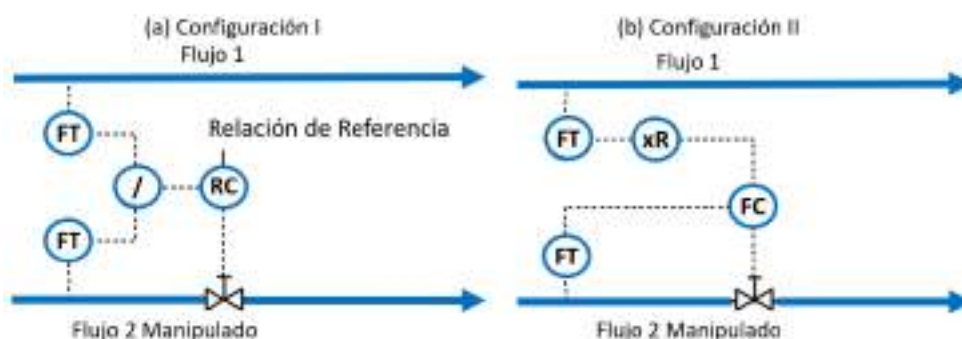
- Acción correctiva en cuanto se presenta una perturbación externa.
- Se presenta la principal limitación en el controlador utilizado en este tipo de esquema se basa en el procesamiento matemático del proceso, ya que el rendimiento efectivo del esquema estará ligado a la precisión y fiabilidad del modelo disponible del proceso.

Estrategia de control de Relación

Se utiliza para controlar la relación entre dos flujos, teniendo en cuenta que solo uno es manipulado pese a que los dos son medidos, cabe destacar que esta estrategia de control lo que se desea mantener es la relación entre dos variables, mas no de una determinada. Para ello se plantea dos configuraciones para el control de relación, como se indican en la Figura 3.

Figura 3

Esquema de la estrategia de control de relación



Nota. En el esquema de la configuración I, se miden los dos flujos, donde se llevan a cabo el elemento que proporciona la relación entre ellos, la cual se compara con la relación set point y se manipula uno de los flujos. Por otro lado, en la configuración II, se mide los dos flujos y se multiplica el flujo 1 por la relación deseada, el resultado es la referencia para el controlador del flujo manipulado.

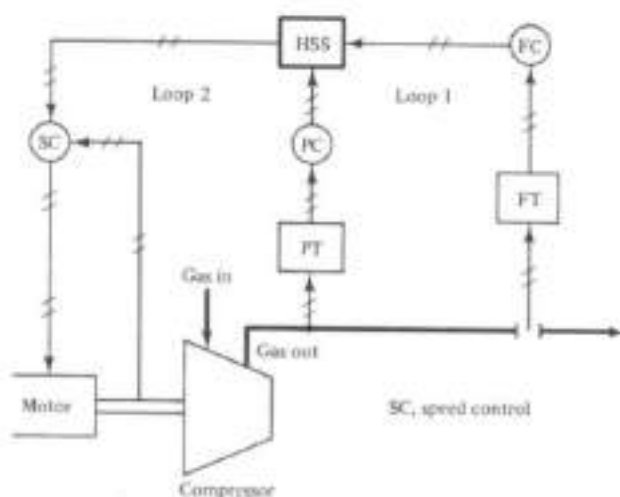
Estrategia de control Override

En esta estrategia de control, se abre la posibilidad de manejar más de una variable, aun cuando solo una sea manipulada inicialmente. Esto se logra mediante la transferencia de la acción de control de un controlador. Para implementar esta técnica, se emplean dispositivos específicos como el HSS (High Selector Switch) y el LSS (Low Selector Switch). Estos interruptores, diseñados para limitar el valor máximo o mínimo de una variable, aseguran que el sistema no exceda los límites establecidos.

Un ejemplo claro se presenta en la Figura 4, donde se representa el sistema de protección de un compresor.

Figura 4

Control Override.



Nota. Sistema donde cuando se recibe una señal determinada un controlador sobrepasa el nivel de prioridad del otro controlador y actúa sobre el lazo. (Puig, y otros, 2020) Recuperado de Planta de producción de óxido de etileno, por Pérez, S., Ruiz, O., Gonzáles, V., García, N., Fernández, X., Candela, P. y Bartrolí, A.

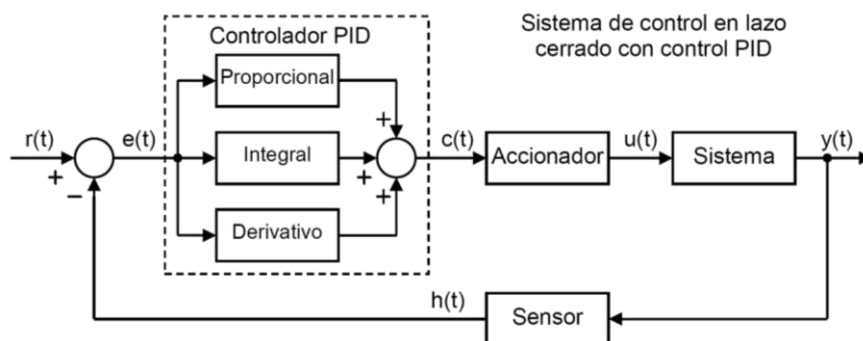
Técnicas de Control

Las técnicas de control On-Off, P, PI, PID se contemplan como control clásico dentro de las industrias, mediante las cuales se utilizan para mantener una variable de proceso estable dentro de un tiempo requerido en un proceso industrial. (Casa Ilaquiche & Ortiz Ortiz, 2017).

Estas técnicas de control tienen como objetivo el control de la salida del proceso industrial en lazo cerrado, el controlador PID se encuentra conformado por parámetros como la parte integral, derivativa e integral, cuya estructura de lazo cerrado se presenta en la Figura 5 (Pardo Martín, 2024).

Figura 5

Sistema de control en lazo cerrado con control PID



Nota. Lazo cerrado del Controlador PID. Tomado de Controladores PID por Carlos Félix Pardo Martín, 2024.

- La referencia de la planta, $r(t)$, que se desea conseguir en la salida del sistema, $y(t)$. (Pardo Martín, 2024)
- La señal del error del proceso, $e(t)$, indica al controlador la diferencia entre la referencia $r(t)$ y el estado real del sistema, $h(t)$. (Pardo Martín, 2024)

En la Tabla 6 se presenta el análisis de las acciones de control (proporcional, derivativa e integral), el objetivo al aumentar los parámetros K_p , K_i , K_d .

Tabla 6

Acción de Control Proporcional, Derivativo e Integral

Acción de Control	Descripción	Análisis
Proporcional	Proporcional a la señal de error la cual es multiplicada por K_p donde se determina la acción proporcional requerida. (Pardo Martín, 2024).	<p>Al aumentar la constante K_p:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la velocidad de respuesta. • Disminuye el error del sistema en estado estable. • Aumenta la inestabilidad.
Derivativa	Proporcional a la derivada de la señal del error la cual es multiplicada por K_d para determinar la acción derivativa. (Pardo Martín, 2024).	<p>Al aumentar la constante K_d:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la estabilidad. • Disminuye un poco la velocidad. • El error permanece igual.
Integral	Proporcional a la integral de la señal de error, la cual es multiplicada por K_i . Para determinar la acción requerida, reduciendo el error del sistema en régimen permanente. (Pardo Martín, 2024)	<p>Al aumentar la constante K_i:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disminuye el error en estado estable. • Aumenta la inestabilidad • Mínimo aumento en la velocidad del sistema

Modelamiento de la Planta

Para definir los parámetros del controlador es necesario describir y predecir el comportamiento de la planta, para ello se necesita representar de forma matemática. Existen diversas técnicas para la creación del modelo matemático el cual representa la relación entre entrada y salida del sistema, las cuales se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7

Técnicas para obtener el modelo matemático de un sistema de control

Técnica	Descripción
Modelado físico	Presentado por el análisis de las leyes físicas las cuales rigen al sistema. Para aplicarlo se necesita un conocimiento profundo de las variables físicas que intervienen en el sistema
Modelado Empírico	Basado en ensayos de la toma de muestras, recopilando información en respuesta a diferentes entradas de control, utilizando posterior para identificar el modelo matemático que se ajusta a esta información.
Identificación de sistemas	Utiliza técnicas matemáticas para estimar un modelo en base a los datos obtenidos en los ensayos realizados.

Nota. En la tabla se presenta las técnicas para obtener el modelo matemático de un sistema de control, en la técnica de identificación de sistemas se puede utilizar el método de mínimos cuadrados o correlación de máxima verosimilitud para identificar el modelo de la planta.

Actualmente existe software que ofrecen herramientas para el modelado matemático de sistemas basados en los datos de entrada y salida del sistema, tal es el caso del toolbox que provee Matlab, System Identification (MathWorks, 2024).

Técnicas de Sintonización del Controlador

Para el ajuste de los parámetros del controlador PID, se establecen dos enfoques principales: basado en modelos y basados en ensayos experimentales.

- Técnica basada en modelos: Usa la función de transferencia del proceso y criterios de diseño establecidos. (Adam, 2020).
- Técnica basada en ensayos experimentales: Realizado por ensayos experimentales para ajustar los parámetros, para identificar parámetros del sistema antes de ajustar el controlador. Utiliza un criterio empírico que permite al diseñador sintonizar los parámetros del controlador. (Adam, 2020).

Actualmente existe software que ofrecen herramientas para la sintonización automática del controlador, en base a la función de transferencia de la planta. Tal es el caso del software de Matlab que posee la herramienta PID-Tuner para la sintonización automática. (MathWorks, 2024)

La herramienta PID-Tuner ajusta automáticamente las ganancias del controlador para que la planta SISO alcance la velocidad de respuesta y la robustez especificada, con lo cual presenta la respuesta de la planta hacia el cambio de set point y el rechazo a perturbaciones. (MathWorks, 2024)

Otra forma de sintonizar el controlador, es de manera manual, que se complementa con cualquier técnica elegida anteriormente, sirve para afinar el controlador, en donde se debe tener en cuenta los efectos que conlleva el variar los parámetros del controlador PID que se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8

Efectos de la variación de los parámetros del controlador PID

Parámetro	Descripción
Acción Proporcional	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar el parámetro Kd: disminuye el error y aumenta la velocidad. • Alcanzada la respuesta deseada el PID se ha sintonizado.
Acción Derivativa	<p>En el caso que el sistema sea demasiado inestable:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar el parámetro derivativo para lograr la estabilidad.
Acción Integral	<p>En el caso que el sistema tenga un error mayor al deseado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar el parámetro integral para disminuir el error con la rapidez deseada. Tener en cuenta si se aumenta tanto se vuelve inestable.

Nota. En la tabla se presenta el análisis entre los 3 parámetros para afinar el controlador PID de forma manual.

HMI

La HMI (Interface Humano - Máquina) es el principal vínculo que existe entre los operadores y el sistema automático de control, el cual es el encargado de proporcionar información sobre el proceso físico.

El comité de la norma ISA 101 ha definido un conjunto de estándares, recomendaciones prácticas e informes técnicos relevantes destinados a ser utilizados en el desarrollo de interfaces hombre-máquina para el control y monitoreo de procesos. Según (ANSI-ISA 101, 2015) presenta el ciclo de vida de una HMI, como se indica en la Figura 6, el cual consta de 4 etapas, donde la parte de operación y diseño se encuentran conectadas por la mejora continua que se realiza posterior a la puesta en marcha y el análisis de resultados de la eficiencia de la HMI.

Figura 6

Ciclo de vida de una HMI



Nota. La figura presenta el ciclo de vida de un HMI, el cual representa el proceso de trabajo continuo que se debe realizar al implementar un interfaz humano máquina

Control de Potencia en Sistemas de Calefacción Eléctrica

En el contexto de los sistemas de calefacción eléctrica, el control de la potencia es esencial para mantener temperaturas adecuadas y lograr un rendimiento óptimo. Las técnicas de control de potencia en sistemas de calefacción eléctrica, con especial enfoque en el uso de la níquelina como elemento final de control se presenta tres enfoques fundamentales: el control de fase, el detector de cruce por cero y la modulación de ancho de pulso (PWM).

Control de ángulo de disparo

El control de ángulo de disparo es una técnica de control de potencia que se utiliza para variar la potencia suministrada a una carga eléctrica mediante el ajuste del momento en que se inicia la conducción de un dispositivo de conmutación electrónica.

El control de ángulo de disparo (CDA) se basa en utilizar el valor eficaz (RMS) de la señal de alterna. El valor RMS es una medida de la potencia promedio de una señal de corriente alterna. Al modificar la forma de onda de la señal de alterna, se puede variar el valor RMS.

El ángulo de disparo se lo define como el número de grados de un ciclo de corriente alterna que transcurren antes que el elemento pase al estado de conducción el cual no comenzará a conducir simplemente por estar polarizado en forma directa.

Detector de cruce por cero

El detector de cruce, como su nombre lo dice, pretende identificar el instante exacto del cruce por cero de la onda de corriente alterna. Cuando la onda cruza por cero, el detector registra este evento, indicando un punto de referencia temporal para iniciar la conducción.

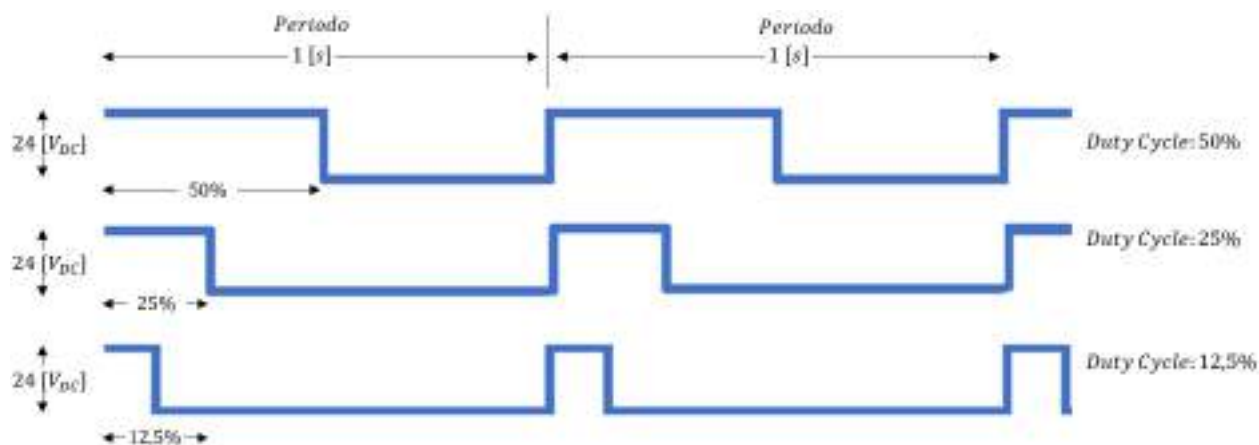
Modulación de ancho de pulso PWM

La modulación de ancho de pulso PWM es una técnica la cual consiste en variar el ancho de pulso de una señal periódica, con el fin de controlar la cantidad de potencia entregada a un dispositivo. (Correa Eras & Remache Ortega, 2006).

PWM relaciona el tiempo en que la señal está en un estado alto y el tiempo en que está en un estado bajo. La modulación de ancho de pulso viene representada por la Figura 7 en donde se visualiza las partes que la conforman, tales como periodo y duty cycle o ciclo de trabajo. Como se observa, se presentan tres ciclos de trabajo con un periodo de 1[s] y ciclo de trabajo de 50, 25 y 12.5 %.

Figura 7

Ejemplos de Modulación de ancho de pulso



Comparación de las técnicas de control de potencia

En la Tabla 9 se analizar y compara tres métodos fundamentales de control de potencia utilizados en sistemas de calefacción: Control de Ángulo de Disparo, Detector de Cruce por Cero y Modulación de Ancho de Pulso (PWM).

Tabla 9

Métodos de Control de Potencia en Sistemas de Calefacción

Característica	Control de Ángulo de Disparo	Detector de Cruce por Cero	Modulación de Ancho de Pulso (PWM)
Principio de Funcionamiento	Ajusta el ángulo de disparo de dispositivos semiconductores para controlar la potencia suministrada.	Identifica el cruce por cero en la onda de corriente alterna para controlar potencia suministrada.	Modula la duración de los pulsos en una señal cuadrada para ajustar la cantidad de potencia entregada.
Sincronización con Dispositivos de Control	Sí, mediante el ajuste del ángulo de disparo de SCR's o TRIAC's.	Sí, utiliza el cruce por cero para sincronizar la activación de dispositivos de control.	Sí, se sincroniza para controlar el ciclo de trabajo y la potencia suministrada.
Regulación de Potencia	Ajusta la potencia mediante el control del ángulo de disparo.	Regula la potencia activando dispositivos en momentos específicos de la onda.	Regula la potencia ajustando la duración de los pulsos en la señal.
Precisión en el Control de Temperatura	Moderada, dependiente del ajuste del ángulo de disparo.	Moderada, dependiente de la sincronización con el cruce por cero.	Alta precisión al modular la potencia de manera fina y proporcional.

Nota. En la tabla se presentan los métodos para el control de potencia los cuales desempeñan un papel esencial en la regulación térmica de dispositivos como niquelina, proporcionando distintas estrategias para ajustar la potencia suministrada y, por ende, la temperatura generada.

Capítulo III. Desarrollo e Implementación

En el presente capítulo, se aborda el análisis preliminar de los módulos didácticos de la estación de proceso CTN-1, donde se identifican los elementos indispensables para llevar a cabo la modernización de los mismos. Se detallan los equipos disponibles y los necesarios para la repotenciación y puesta en marcha del sistema.

Además, se proporciona un detalle exhaustivo de los diagramas necesarios para la puesta en marcha del sistema, el levantamiento de la conexión de los componentes eléctricos, en el plano multifilar. Así mismo, se desarrolla el GRAFCET con una estructura jerárquica. Finalmente se expone el diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI) basado en la guía High Performance.

Estación de Procesos CTN-1

La estación de procesos CTN-1, situada en el laboratorio de instrumentación y sensores de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", ha sido objeto del proyecto de titulación previo por David Moya en el 2022, el cual se ha utilizado como referencia para partir con el desarrollo de la repotenciación de esta estación.

En la Figura 8 se presenta la ilustración de la estación de procesos CTN-1, la cual consta de tres tanques con un objetivo cada uno, los cuales permiten el control de nivel, temperatura y caudal. Este diseño se ha realizado con el fin de preparar a los futuros profesionales de la carrera de Electrónica y Automatización, en donde se puede analizar las técnicas de control para nivel y temperatura, así como, familiarizarse con instrumentos industriales.

Figura 8*Estructura de la Estación de Procesos CTN-1*

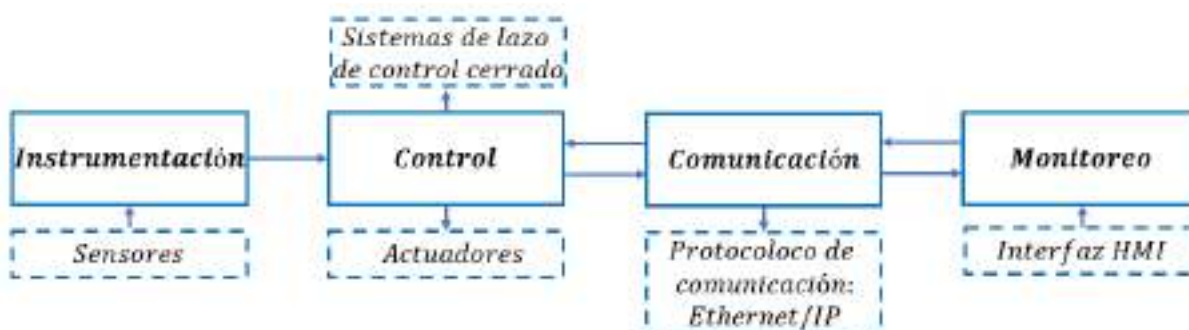
En el Apéndice 1, se presenta el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) de la estación de entrenamiento. Estos diagramas ofrecen una representación visual detallada de las operaciones y flujos de procesos específicos de cada unidad. Además, en el Apéndice 2, se presenta el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) detallado de cada componente del sistema.

El sistema de entrenamiento recopila los datos de las variables físicas presentes en el proceso, tales como caudal, temperatura y nivel. Se emplea un controlador lógico programable (PLC) como dispositivo principal encargado de interpretar todas las señales provenientes de la estación y ejecutar las acciones de control. El proceso es supervisado a través de una interfaz HMI (Interfaz Hombre-Máquina), con el propósito de visualizar e interpretar los datos, así como

tener el control sobre la modificación de los parámetros de control, el diagrama de bloques que se indica en la Figura 9 muestra la forma en la que se interrelacionan los procesos para así integrar el sistema de entrenamiento.

Figura 9

Diagrama de bloques del sistema de entrenamiento



Nota. La figura representa las partes centrales del sistema de entrenamiento que se encuentra implementado.

Ingeniería Conceptual

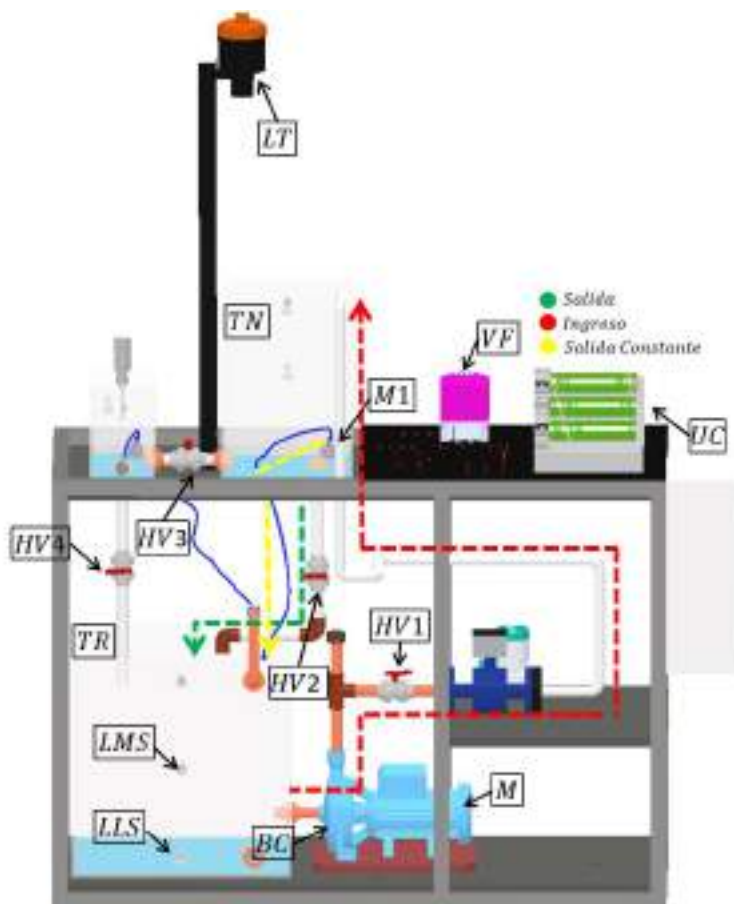
En el entorno industrial el implementar técnicas de control se traduce con el fin de mejorar la calidad, optimizar procesos, reducir errores lo cual viene relacionado con la eficiencia del sistema, no obstante, el implementar dichas técnicas en la estación de entrenamiento industrial representa firmemente en la mejora en la academia, en la formación de futuros operadores y técnicos. El sistema de entrenamiento industrial se conforma de dos procesos, nivel y temperatura.

Proceso 1: Variable de Nivel

Este proceso consta de dos tanques de reserva, el principal y de nivel. En la Figura 10 se puede visualizar la entrada, señalado en rojo, la salida del sistema flujo constante, señalado en amarillo, y la salida que se puede habilitar mediante una válvula manual, señalado en verde. Este proceso tiene como objetivo de control mantener el nivel del tanque dentro del set point ingresado por la HMI, en el rango de 0-35[cm]. El controlador monitorea continuamente el nivel para así ajustar la salida variador de frecuencia para mantener el nivel deseado.

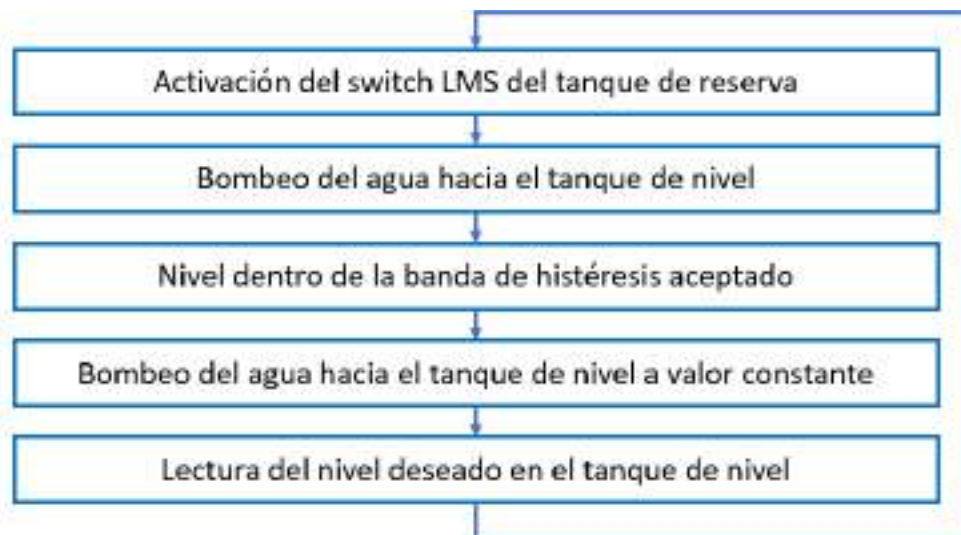
Figura 10

Proceso 1 de la Estación de Procesos CTN-1



En la Figura 10 se encuentra identificados los elementos requeridos para el funcionamiento del proceso 1, el cual consta de dos tanques de reserva, principal (TR) y de nivel (TN). Para bombear el agua desde (TR) hacia (TN), el (TR) debe tener un nivel medio de agua verificado con (LLS) y (LMS). Posteriormente, se activa la bomba centrífuga (BC), para ello requiere un motor (M) y un variador de frecuencia (VF) el cual permite controlar la velocidad del motor de la bomba lo que es fundamental para el control de nivel requerido. Para este proceso se requiere que la válvula manual principal (HV1) se encuentre abierta, mientras que las válvulas (HV4-2-3) se encuentren cerradas para permitir el flujo del caudal de agua hasta el Tanque (TN). Donde por medio del sensor ultrasónico (LT) se medirá el nivel en tiempo real para comprar con el set point. El controlador (UC) monitorea continuamente el nivel para ajustar la salida de (VF). El sistema cuenta con una salida constante por la activación de la válvula sumergible (M1).

La secuencia de operación de proceso 1, se compone de las tareas que se presentan en la Figura 11. Al inicio, el switch LMS del tanque de reserva debe estar activo para lo cual, se procede a activar la bomba centrífuga BC controlada por el variador de frecuencia con la frecuencia máxima, cuando el nivel del líquido del tanque de nivel se encuentre en la posición deseada la bomba centrífuga se mantiene bombeando agua a una frecuencia constante cuando el nivel se encuentra dentro de la banda de histéresis. Se debe tener en presente que la bomba sumergible se encuentra activa a todo instante.

Figura 11*Tareas del Proceso 1*

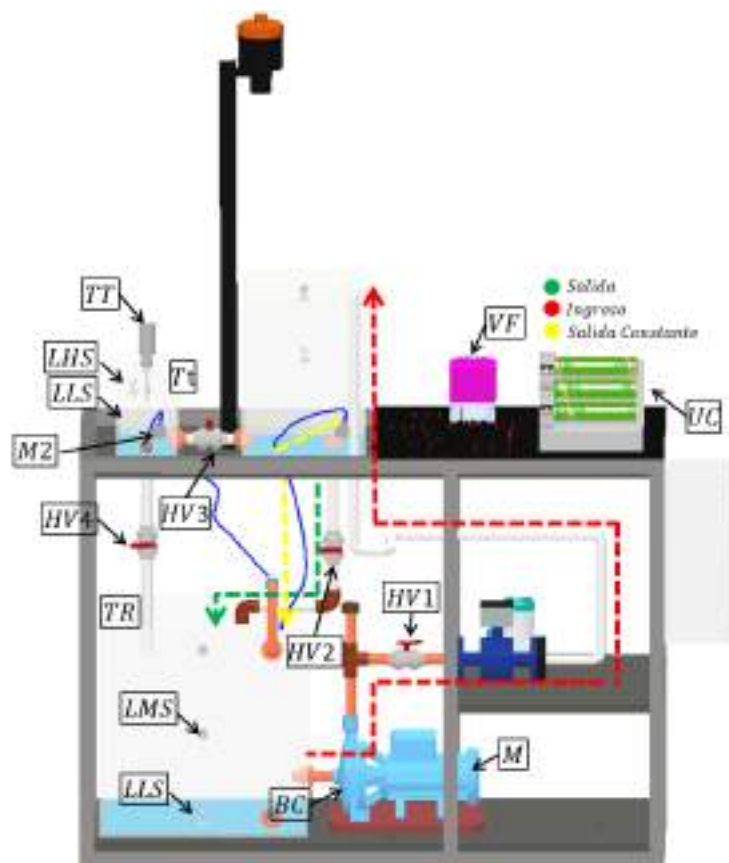
En el Apéndice 3, se presenta el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) detallado del proceso 1.

Proceso 2: Variable de Temperatura

Este proceso consta de dos tanques de reserva, el principal y de temperatura. En la Figura 12 se puede visualizar la entrada, señalado en rojo, las salidas del sistema, señalado en amarillo. Este proceso tiene como objetivo de control mantener la temperatura del líquido del tanque dentro del set point, en el rango de 10 a 60 [°C]. El controlador monitorea continuamente la temperatura para así ajustar la salida del sistema de calentamiento (niquelina) para mantener la temperatura deseada.

Figura 12

Proceso 2 de la Estación de Procesos CTN-1



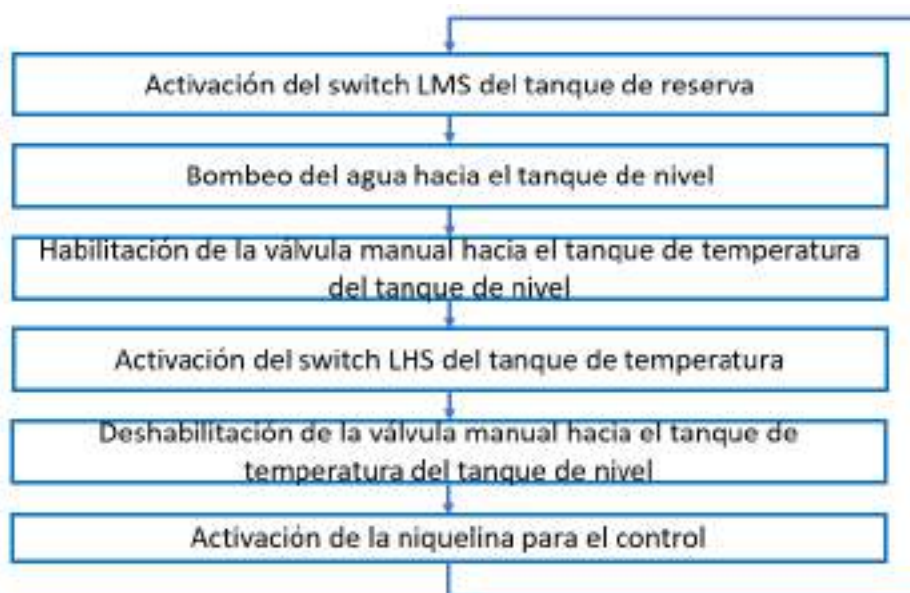
En la Figura 12 se puede visualizar los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema, el cual cuenta con dos tanques de reserva, el principal (TR) y de temperatura (Tt). Para bombear el agua desde (TR) hacia (Tt), el (TR) debe tener un nivel medio de agua verificado cuando se activa (LLS) y (LMS), posterior se activa la bomba centrífuga (BC), para ello requiere un motor (M) y un variador de frecuencia (VF). Para la circulación de caudal se requiere que la válvula manual principal (HV1) y válvula manual (HV3) se encuentren habilitadas. Por medio del transmisor de temperatura (TT) se mide la temperatura del tanque. Se debe tener en cuenta que el (Tt) cuenta con una bomba centrífuga (M2) que se activa

cuando se ha finalizado la acción de control, para comenzar el control temperatura se debe tener el (Tt) a un nivel alto de agua activación de (LLS) y (LHS).

La secuencia de operación del proceso 2, se compone de las tareas que se presentan en la Figura 13. En un inicio, el switch LMS del tanque de reserva debe estar activo, lo que enciende la bomba centrífuga BC controlada por el variador de frecuencia con la frecuencia máxima. Cuando el switch LHS del tanque de temperatura se active, la bomba centrífuga deja de bombear líquido y comienza el control de temperatura por parte de la niquelina.

Figura 13

Tareas del Proceso 2



En el Apéndice 3, se presenta el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) detallado de cada componente del proceso 2

Ingeniería Básica y de Detalle

En esta sección se presenta el desarrollo e implementación del control de nivel y temperatura de la estación de procesos CTN-1, donde se detalla el modelamiento de las plantas, la sintonización de los controladores, la lógica de programación, así como el diseño de la HMI.

Componentes Mecánicos

En la Tabla 10 se presenta a manera de resumen las descripciones de los elementos mecánicos instalados, abordando tanto aquellos que fueron objeto de mantenimiento y reparación, como los nuevos elementos incorporados para mejorar y optimizar el rendimiento del sistema.

Tabla 10

Descripción técnica de los tanques de la estación de proceso CTN-1

Elemento	Código	Descripción	
Tanque de reserva	TR	Volumen	80 lt
Tanque de nivel	TN	Volumen	50 lt
Tanque de temperatura	Tt	Volumen	10 lt
Tuberías		Material	Polietileno
		Volumen	½ y ¾ pulgadas

Componentes Eléctricos

Para determinar el estado inicial de la estación de proceso, se realiza un análisis de la estructura física del sistema seguida del levantamiento detallado de los equipos presentes en el área de estudio. Este proceso incluye la identificación y registro de cada componente, en el cual se evidencia cables, actuadores y sensores desconectados y fuera de funcionamiento.

La información recopilada se presenta en una matriz de evaluación en la Tabla 11 y Tabla 12, donde se identifican un total de nueve componentes los cuales presentan estado no operativo. En virtud de esta observación, es importante delinear el procedimiento y tres estrategias realizadas para restablecer la funcionalidad de dichos componentes, las cuales se especifican en la columna de "Acciones Sugeridas", donde la acción destacada en negrilla en la columna es la que se ha llevado a cabo para poner en modo operativo el equipo.

La identificación de componentes con fallos se divide en dos grupos: aquellos con defectos irreparables y aquellos que pueden solucionarse mediante mantenimiento.

Tabla 11

Matriz de evaluación de los componentes de la estación

Código	Componente	Descripción	Estado	Acciones Sugeridas
BC	Bomba centrífuga	Bombeo de líquido (tanque de temperatura al tanque de reserva)	No Operativo	* Realizar Mantenimiento * Revisar Conexiones * Reemplazar Equipo
M1	Bomba sumergible	Bombeo de líquido (tanque de nivel al tanque de reserva)	Operativo	
EV	Electroválvula ¾ NC	Válvula con solenoide permite el paso del líquido del tanque de temperatura hacia el de reserva	No Operativo	* Realizar Mantenimiento * Revisar Conexiones * Reemplazar Equipo
E1	Niquelina	Genera calor de manera controlada para el calentamiento del agua.	No Operativo	* Realizar Mantenimiento * Revisar Conexiones * Reemplazar Equipo
VF	Variador de frecuencia	Permite ajustar la velocidad de operación del motor para bombear agua al sistema	Operativo	
LLS	Flotador Switch	Sensor de nivel bajo del tanque de reserva		* Realizar Mantenimiento
LLS	Flotador Switch	Sensor de nivel bajo del tanque de temperatura	No Operativo	* Revisar Conexiones
LLS	Flotador Switch	Sensor de nivel bajo del tanque de nivel		* Reemplazar Equipo
LHS	Flotador Switch	Sensor de nivel alto del tanque de nivel		
LHS	Flotador Switch	Sensor de nivel alto del tanque de reserva		
LMS	Flotador Switch	Sensor de nivel medio del tanque de nivel	Operativo	
LMS	Flotador Switch	Sensor de nivel medio del tanque de reserva	Operativo	
TR	Tanque	Tanque de reserva principal	Operativo	
TN	Tanque	Tanque de nivel	Operativo	

Nota. Presenta la valoración de los elementos de la estación, donde se especifica el código asignado, descripción detallada del funcionamiento y estado actual clasificándolo como en operativo/no operativo y las acciones sugeridas para solucionarlo.

Tabla 12

Matriz de evaluación de los componentes de la estación

Código	Componente	Descripción	Estado	Acciones Sugeridas
TT	Sensor de temperatura	Sensor RTD de temperatura del tanque de temperatura	Operativo	
QT	Caudalímetro	Sensor desde el tanque de reserva hacia el de nivel	Operativo	
Tt	Tanque	Tanque de temperatura	Operativo	
LHS	Flotador Switch	Sensor de nivel alto del tanque de temperatura	Operativo	
PNC	Pulsador NC	Pulsador para paro determinado	Operativo	
PNA	Pulsador NA	Pulsador para puesta en marcha	Operativo	
PZ	Pulsador de seta	Pulsador para emergencia	Operativo	
LIV	Luz Indicadora verde	Indicador de paro determinado	Operativo	
LIR	Luz Indicadora roja	Indicador de puesta en marcha	No Operativo	* Realizar Mantenimiento
LIA	Luz Indicadora amarilla	Indicador de emergencia	No Operativo	* Revisar Conexiones * Reemplazar Equipo
HV1	Válvula Manual	Válvula manual para el paso del líquido del tanque de reserva hacia el tanque de nivel.	Operativo	
HV2	Válvula Manual	Paso del líquido (tanque de nivel al tanque de reserva)	Operativo	
HV4	Válvula Manual	Paso del líquido (tanque de nivel al tanque de temperatura)	Operativo	
HV3	Válvula Manual	Paso del líquido (tanque de temperatura al tanque de reserva)	Operativo	

Nota. Presenta la valoración de los elementos de la estación, donde se especifica el código asignado, descripción detallada del funcionamiento y estado actual clasificándolo como en operativo/no operativo y las acciones sugeridas para solucionarlo.

A continuación, en la Tabla 13 se detallan las acciones específicas llevadas a cabo para cada componente, proporcionando una visión detallada de las intervenciones realizadas.

Tabla 13

Acciones para poner en modo operativo los componentes

Componente	Acciones Realizadas
Bomba Centrífuga	Mantenimiento debido a posible corrosión ya que al arrancar el sistema se presentaba impurezas.
Electroválvula	<p>No se encontraba operativa para lo cual se siguió los siguientes pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="462 1039 943 1068">1. Verificar la alimentación eléctrica. <li data-bbox="462 1144 1011 1173">2. Revisar la bobina para posibles daños. <li data-bbox="462 1249 1313 1278">3. Inspeccionar visualmente en busca de obstrucciones o daños. <li data-bbox="462 1354 1195 1383">4. Limpiar la electroválvula para eliminar obstrucciones. <li data-bbox="462 1459 1247 1488">5. Realizar pruebas de continuidad en cables y conexiones. <li data-bbox="462 1564 1062 1593">6. Verificar la presión y el caudal del sistema. <li data-bbox="462 1669 1230 1698">7. Realizar pruebas en vacío para detectar posibles fugas. <p>La falla persistía por lo cual se reemplazó el elemento.</p>

Componente	Acciones Realizadas
Niquelina	La niquelina exhibía evidentes signos de deterioro, manifestados en fisuras y roturas a lo largo de su estructura. Estas imperfecciones comprometían su integridad y funcionamiento, indicando la necesidad inminente de sustituir el componente.
Flotador	1. Inspección visual en busca de daños.
Switch	2. Verificación de conexiones eléctricas.
LHS – LMS - LLS	La decisión de reemplazar los Sensores de nivel se basa en la gravedad de los daños, la falta de respuesta a las reparaciones.
Luz	1. Verificación de conexiones eléctricas.
Indicadora	2. Comprobación del funcionamiento del flotador.
LIR - LIA	La causa subyacente del mal funcionamiento residía en una conexión inadecuada. Una vez corregida, se restableció el adecuado funcionamiento de la luz indicadora.

Nota. En la tabla se presenta el análisis entre los 3 parámetros para afinar el controlador PID de forma manual.

Elementos de medición

En la Tabla 14 se presenta elementos de medición, abordando tanto aquellos que fueron objeto de mantenimiento como los nuevos elementos incorporados para mejorar y optimizar el rendimiento del sistema.

Tabla 14

Especificaciones técnicas de los elementos de medición

Elemento	Código	Descripción	
		Rango	0-150 lt/min
		Principio de medición	Inducción electromagnética
Medidor Siemens		Voltaje de alimentación	11– 30 VDC
Sitrans FM MAG	QE	Consumo Corriente	2.5 – 7 mA
5100W		Salida Analógica	4 – 20 mA
		Rango	0-150 lt/min
		Error de medición	0.2% ± 1mm/s
		Salida Analógica	4 – 20 mA
		Distancia máxima	10 m
RELFEK RVT	LT	Distancia de anulación	0.35 m
TRANSDUCER		Voltaje de alimentación	10 – 25 V _{DC}
		Resolución	1 mm
		Precisión	±0.25%
Switch de nivel		Tipo	Flotador Switch
de agua	LS	Salida	Contacto NO o NC
		Voltaje de alimentación	5 - 24 V _{DC}

Elemento	Código	Descripción	
Sensor de temperatura Allen Bradley 873E	TT	Voltaje de alimentación	12 – 30 V _{DC}
		Salida Analógica	4 – 20 mA
		Precisión	0.2 °C
		Repetibilidad	0,1 °C

Elementos finales de control

En la Tabla 15, se presenta a manera de resumen las descripciones técnicas de los elementos finales de control, abordando tanto aquellos que fueron objeto de mantenimiento, como los nuevos elementos incorporados para mejorar y optimizar el rendimiento del sistema.

Tabla 15

Descripción técnica de los actuadores de la estación de proceso CTN-1

Elemento	Código	Descripción	
Bomba centrífuga POMPETRAVAINI MCM20161	BC	Caudal	30-110 lt/min
		Potencia	1.5 HP
		Salida/Entrada	3/4"
		Voltaje de alimentación	220 - 380 V _{AC}
		Consumo de corriente	4.9 - 2.8 A
Bomba sumergible SUNTERRA	MQ	Frecuencia	60 Hz
		Voltaje de alimentación	120 V _{AC}
		Potencia	19 Watts
Resistencia Eléctrica	E1	Material	Cobre chapado
		Voltaje de alimentación	220 V _{AC}
		Potencia	500 Watts

Elemento	Código	Descripción	
		Corriente de salida	7 [A]
Variador de Frecuencia	VF	Voltaje de alimentación	220 V _{AC}
Invertek Drivers		Tipo de Salida	Trifásica
		Potencia	1.5 [kW] 2 [HP]
		Voltaje de alimentación	12 V _{DC}
		Potencia consumo	8 Watts
Electroválvula tipo	EV	Conector tubería	Rosca externa 3/4"
solenoide 3/4 NC			Apertura: ≤ 0.15 s
		Tiempo de respuesta	Cerrado: ≤ 0.3 s

Implementación del Hardware de la estación de procesos CTN-1

Una vez analizados los componentes eléctricos y mecánicos se presenta la instalación y configuración de los componentes implementados en la estación de procesos CTN-1.

Instalación del Sensor Ultrasónico Relfex RVT

Para la instalación del sensor ultrasónico Relfex RVT, se toma en cuenta las recomendaciones propuestas por el fabricante. Para el montaje del equipo se tiene en cuenta las características del material que se está midiendo.

- Material: Agua
- Montaje: El transmisor debe estar lo más perpendicular posible al producto.

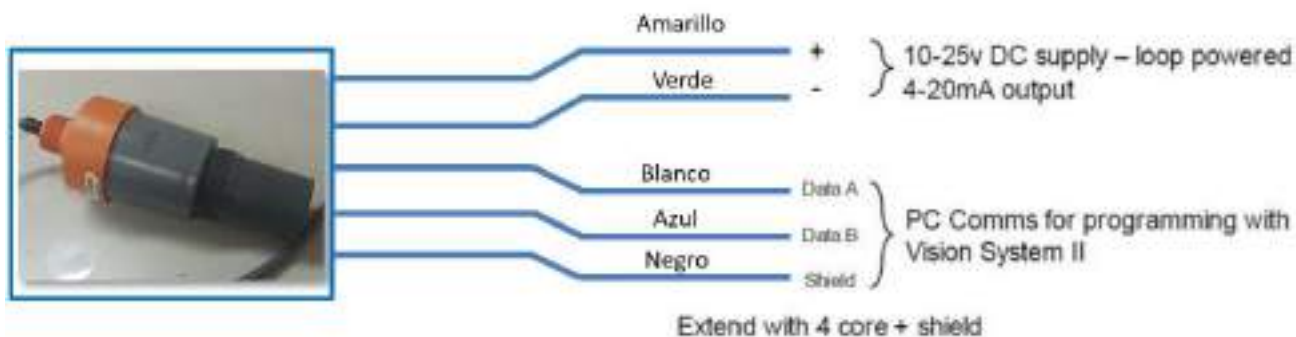
El fabricante recomienda las dimensiones de la instalación, recomienda que la distancia entre la cara del transductor y el nivel de producto más alto esperado en el tanque sea siempre mayor que el valor de distancia de supresión. (Hycontro, 2010)

- Transmisor: MS 10
- Mínimo predeterminado: 0,35 [m] / 1.2 [pies]

La Conexión eléctrica que menciona el fabricante se realiza en base del diagrama propuesto en la Figura 14.

Figura 14

Conexión eléctrica del sensor ultrasónico Relfex RVT



Nota. El gráfico representa los hilos de conexión del sensor ultrasónico y como se realiza las conexiones eléctricas del mismo. Tomado del manual de instrucciones del Microflex LR Transmisor inteligente por Hycontrol.

Configuración del Sensor Ultrasónico Relfex RVT

Vision System II es una herramienta de diagnóstico que permite al usuario programar el transmisor inteligente. (Hycontro, 2010). Para la configuración se debe establecer conexión entre la PC y el bus RS485.

Para establecer la conexión se puede realizar conexión directa a un puerto com de PC mediante un conversor USB-RS485, un conversor RS232 a RS485 o un adaptador PCMCIA RS485 (Hycontro, 2010). Posterior se procede a acceder a los parámetros básicos y lectura del sensor, mediante los siguientes pasos:

1. Ejecutar el programa VisionSystemII
2. Conectarse al instrumento.
3. Seleccione ID del dispositivo.
4. Configurar parámetros básicos. Utilizar los parámetros de la Tabla 16.
5. Observar las propiedades del producto y establecer parámetros de comunicación, ingresar a opciones posterior propiedades. Utilizar los parámetros de la Tabla 17.
6. Presionar botón conectar para establecer comunicación. El ícono del botón cambia a un teléfono colgado y ahora se usa para desactivar la comunicación y muestra una pantalla de "Información". (Hycontro, 2010)

Tabla 16*Parámetros básicos de configuración*

Parámetro	Valor
Nivel Bajo	Distancia desde la cara del transductor corresponde al nivel bajo. Nivel de salida de 4 [mA].
Nivel Alto	Distancia desde la cara del transductor corresponde al nivel alto. Nivel de salida de 20 [mA].
Aplicación	Selección entre lodo, líquido o sólidos.
A prueba de fallos	Seleccionar la salida de [mA] requerida en modo de falla.
Tiempo seguridad	Tiempo en segundos antes de que se indique el fallo.

Nota. Para verificar que se hayan aceptado los parámetros ingresados se debe hacer clic en el botón de leer todos los parámetros y verificar si son correctos.

Tabla 17*Parámetros de configuración*

Parámetro	Valor
ID	01 valor predeterminado
Unidades	Metros
Puerto	Puerto de la PC que utiliza su comunicación RS485
Nivel de acceso	Básico
Velocidad de comunicación	19200

Nota. En la tabla se presentan los parámetros de configuración realizados en el equipo, en caso de otra aplicación puede variar las unidades (metros, pies).

Instalación del Variador de Frecuencia Invertek Drivers

El procedimiento de instalación del variador de frecuencia implica fijarlo al riel DIN estándar de 35 mm que está ubicado en el panel de conexiones. El fabricante presenta generalidades para la instalación mecánica:

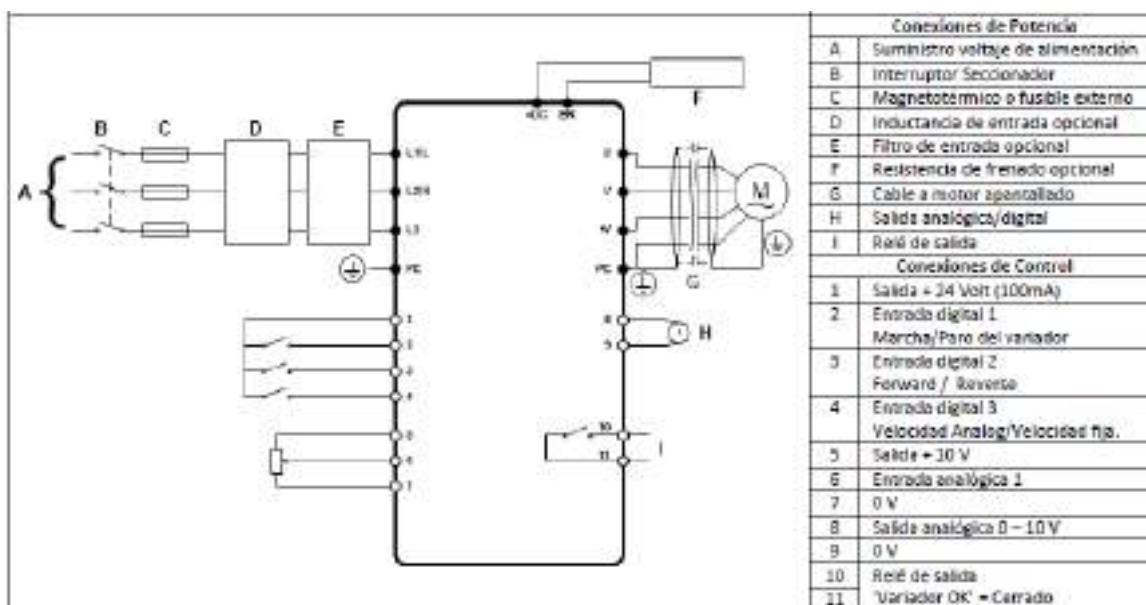
- Ranuras de ventilación del variador libres.
- El equipo debe montarse de forma vertical sobre una superficie plana, libre de vibraciones y sujeto mediante carril DIN.

- El lugar de montaje y soportes elegidos deben ser suficientes para soportar el peso del equipo.

El cableado de los terminales de control, se debe seguir el esquema de conexión que proporciona el fabricante indicado en la Figura 15.

Figura 15

Conexiones de control y de potencia



Nota. En la figura se presenta las conexiones de control y de potencia que presenta el fabricante del variador de frecuencia. Tomado de Instrucciones de Instalación y Operación (p.13) por Invertek Drivers, 2016.

Configuración del Variador de Frecuencia Invertek Drivers

Para realizar la configuración del variador de frecuencia se aplica la información proporcionada por el fabricante, descrita en el manual de usuario, se debe tomar en cuenta que la configuración se la realiza en base a las especificaciones técnicas del motor que se presenta en la Tabla 15, los parámetros configurados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18

Configuración de parámetros variador Invertek Drivers

Parámetro	Descripción	Valor
P-01	Frecuencia / Velocidad Máxima	60 [Hz]
P-02	Frecuencia / Velocidad Mínima	0 [Hz]
P-03	Tiempo Rampa de Aceleración	10 [s]
P-04	Tiempo Rampa de Deceleración	5 [s]
P-07	Voltaje Nominal del Motor	220 [V]
P-08	Corriente Nominal del Motor	4.9 [A]

Nota. En la tabla se presenta la recopilación de los elementos finales de control, así como los indicadores que posee el sistema, según los tipos de salida requerida.

Selección del Controlador

Tomando en cuenta los elementos de medición y elementos finales de control, en la Tabla 19 y Tabla 20 se presenta un desglose de dichos elementos de entrada y salida especificando el tipo de señal requerida por cada componente. Este enfoque permite seleccionar un controlador capaz de gestionar todas las interacciones del sistema, garantizando una implementación coherente y eficiente del control lógico programable.

Tabla 19

Listado de elementos para entradas del controlador

N°	Elemento	Tipo	Cantidad
1	Transmisor SIEMENS SITRANS F M MAG 6000I	Analógica 4-20 mA	1
2	Sensor Ultrasónico Relfex RVT	Analógica 4-20 mA	1
3	Sensor de temperatura Allen Bradley 873E	Analógica 4-20 mA	1
4	Switch de nivel tipo flotador	Digital	8
5	Pulsador N.O.	Digital	1
6	Pulsador N.C	Digital	1
7	Pulsador tipo Zeta	Digital	1

Nota. En la tabla se presenta la recopilación de los elementos de medición, así como los pulsadores que posee el sistema, según los tipos de entrada requerida.

Tabla 20*Listado de elementos para salidas del controlador*

N°	Elemento	Tipo	Cantidad
1	Bomba centrífuga	Digital	4
2	Bomba sumergible	Relé	2
3	Electroválvula	Relé	1
4	Resistencia Eléctrica	Digital	1
5	Luces Piloto Amarillo, verde, rojo	Relé	3

Tomando en cuenta los requerimientos de entradas y salidas del proceso expuestas, se toma en cuenta que se necesita mínimo 5 salidas digitales, 6 salidas tipo relé, 3 entradas analógicas de 4 a 20 mA y 11 entradas digitales. Para lo cual en la Tabla 21. se presenta el controlador y los módulos de expansión seleccionados para cumplir con los requerimientos.

Tabla 21*Descripción técnica del controlador y módulos de expansión*

Elemento	Código	Descripción
		Voltaje de alimentación
		120/240 V _{AC}
		Entradas digitales
		(6) 24 V _{DC}
		Entradas analógicas
		(2) voltaje 0-10 V _{DC}
PLC Micrologix		Salidas digitales
1100 y módulos	UC	(6) Tipo relé
de expansión		Módulo 1762-IQ8
		8 entradas Digitales
		Módulo 1762-OB16
		16 salidas Digitales
		Módulo 1762-IF4
		4 entradas Analógicas (I/V)
		Módulo 1762-OF4
		4 salidas Analógicas (I/V)

Configuración y Programación del PLC

En esta sección se realizará la comunicación del PLC-Computador, la asignación de variables y la implementación del graficet, así como la comunicación entre PLC-HMI utilizando el software de Ignition.

Comunicación entre Computador y PLC

La comunicación se realiza mediante la conexión Ethernet cuya configuración se detalla en los siguientes pasos:

Paso 1. Asignar la dirección IP al computador mediante el protocolo TCP/IP (192.168.0.22).

Paso 2. Asignar la dirección IP al PLC con BOOTP-DHCP Server (192.168.0.1).

Paso 3. Configuración mediante software RSLinx el driver Ethernet. Creado el el driver AB_ETHIP-1 se selecciona la tarjeta de red de la PC.

Configuración del PLC y los módulos de expansión

La configuración del PLC y de los módulos de expansión se llevan a cabo mediante los siguientes pasos:

Paso 1. En el software RSLogix Micro → Crear nuevo proyecto → Seleccionar el tipo de procesador Bul. 1763 Micrologix 1100 Serie B.

Paso 2. En la opción IO Configuration → Clic en Read IO Config para realizar el reconocimiento de los módulos de expansión.

Paso 3. Como los elementos primarios de medición entregan una salida de 4 a 20 [mA], se selecciona el módulo 1762-IF4 con el rango de entrada de 4 – 20 [mA].

Paso 4. Realizadas las configuraciones pertinentes se procede a realizar la asignación de recursos (entradas, salidas) tanto analógicas como digitales, como se presenta en la Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 donde se detalla la descripción de cada uno de ellos, el tag y la dirección asignada.

Paso 5. Implementación del graficet jerárquico presentado en el Apéndice 4.

Tabla 22

Tabla de asignación de recursos de tipo Salidas Digitales

N°	Descripción	Tag	Dirección
1	Luz de funcionamiento del automatismo	Luz_Funcionamiento	O:0/0
2	Luz de paro del automatismo	Luz_Paro	O:0/1
3	Luz de emergencia del automatismo	Luz_Emergencia	O:0/2
4	Bomba sumergible del tanque de nivel	Bomba_TN	O:0/3
5	Bomba sumergible del tanque de temperatura	Bomba_TT	O:0/4
6	Salida de activación de la Electroválvula	EV	O:0/5
7	Salida de activación de la Niquelina	Niquelina	O:0/7

N°	Descripción	Tag	Dirección
8	Señal de activación para el variador de frecuencia	Drive_Variador	O:2/0
9	Activación de la señal PWM	Salida_PWM	O:2/6
10	Activación de la salida del variador.	Salida_Variador	O:4.0

Nota. En la tabla se presenta la asignación de recursos de las salidas digitales utilizadas en el trabajo de titulación.

Tabla 23

Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Digitales

N°	Descripción	Tag	Dirección
1	Pulsador que da inicio al automatismo	Inicio	I:0/0
2	Pulsador para solicitar paro fin de ciclo	Paro	I:0/1
3	Pulsador con retención para detener el proceso	Emergencia	I:0/2
4	Switch de nivel mínimo del tanque de reserva	SNTR1	I:0/3
5	Switch de nivel medio del tanque de reserva	SNTR2	I:0/4
6	Switch de nivel alto del tanque de reserva	SNTR3	I:0/5
7	Switch de nivel mínimo del tanque de nivel	SNTN1_L	I:0/6

N°	Descripción	Tag	Dirección
8	Switch de nivel medio del tanque de nivel	SNTN2_M	I:0/7
9	Switch de nivel alto del tanque de nivel	SNTN3_H	I:0/8
10	Switch de nivel mínimo tanque de temperatura	SNTT1_L	I:0/9
11	Switch de nivel alto tanque de temperatura	SNTT2	I:1/0

Nota. En la tabla se presenta la asignación de recursos de las entradas digitales y analógicas utilizadas en el trabajo de titulación.

Tabla 24

Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Analógicas

N°	Descripción	Tag	Dirección
1	Indicador / Transmisor MAG6000I 4-20 [mA]	S_CAUDAL_SIEMENS	I:3.0
2	Trasmisor temperatura Allen Bradley 4-20 [mA]	S_TEMPERATURA	I:3.1
3	Transmisor Relfex RVT de nivel 4-20 [mA]	S_Nivel	I:3.3

Nota. En la tabla se presenta la asignación de recursos de las entradas analógicas utilizadas en el trabajo de titulación.

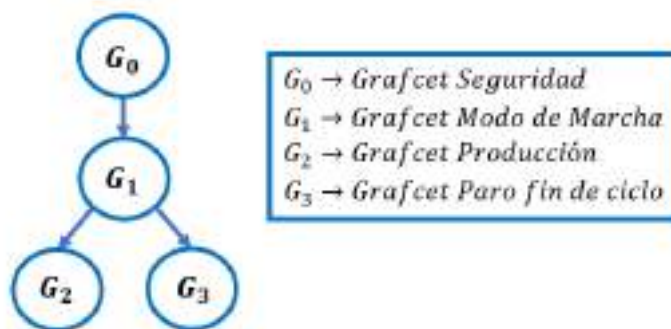
Criterios de Diseño para la programación del controlador

Automatizar la estación de procesos CTN-1 de los procesos 1 y 2, bajo las siguientes consideraciones: En modo de emergencia, considerar las condiciones de seguridad del automatismo, permitir el inicio del proceso 1 y proceso 2 y habilitar la modificación de los parámetros de los controladores PID tanto de nivel como de temperatura e históricos de las variables del control, set point, variable manipulada y de proceso.

Requerimientos para el sistema de control de los dos procesos: seguridad, modo de marcha automático, producción normal, paro fin de ciclo, para ello considerar el grafcet estructurado para la programación presentado en la Figura 16.

Figura 16

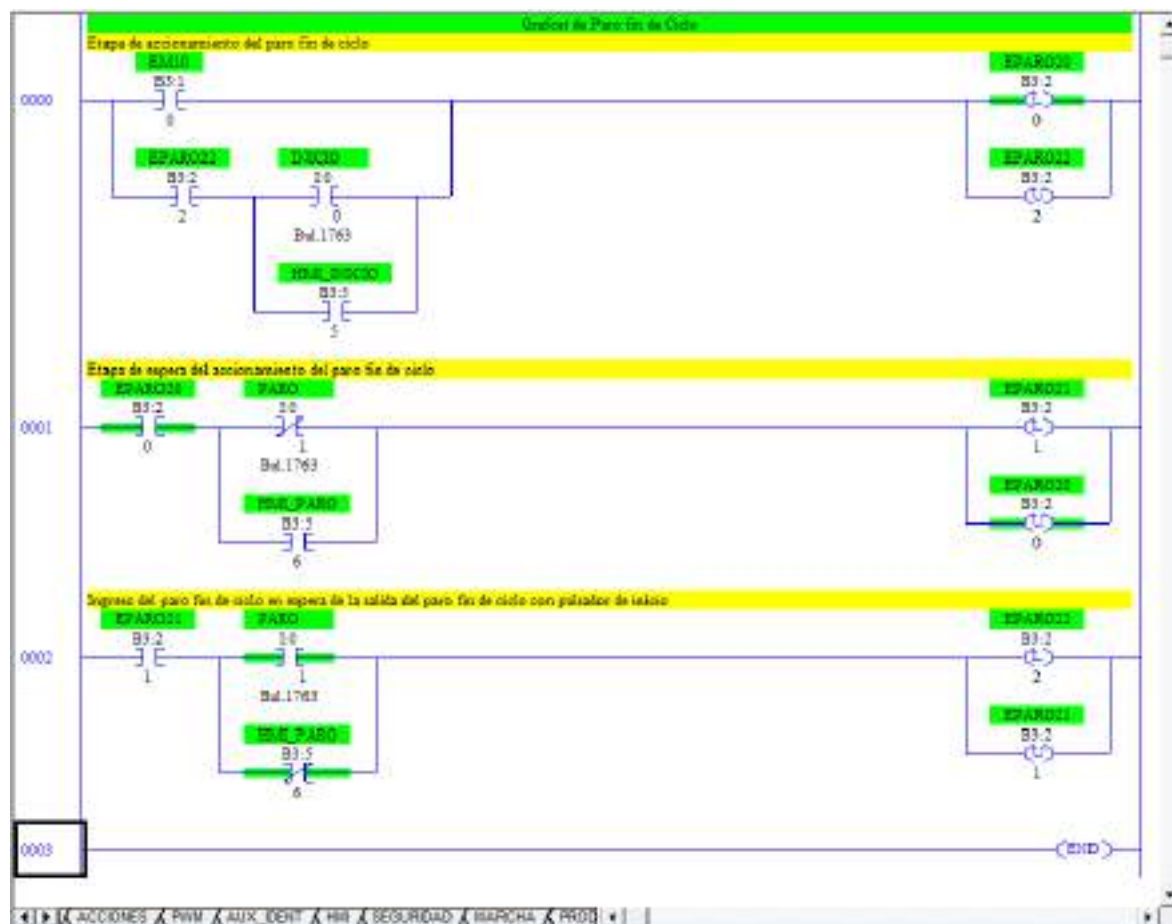
Grafcet estructurado para la programación



El lenguaje de programación que el software RLogix Micro permite es con lógica de escalera o Ladder, en la Figura 17 se presenta un fragmento de la programación realizada para el paro fin de ciclo. El grafcet de segundo nivel se puede visualizar en el apéndice 5.

Figura 17

Programación del Grafset de Paro Fin de Ciclo



Nota. la imagen ilustra un fragmento de la programación del grafset del paro fin de ciclo, en el cual se detiene el control tanto de nivel como de temperatura y el sistema vuelve a condiciones iniciales.

Se ha analizado el hardware que compone la estación de procesos CTN-1, elementos finales de control, elementos de medición, elementos mecánicos, dimensionamiento del controlador a utilizar y los criterios de diseño para la lógica de programación. A continuación, se presenta la fase de control de potencia, el modelamiento de las plantas y la sintonización de los controladores.

Fase de Control de Potencia de la Niquelina

En la fase de control de potencia de la niquelina se realiza con la aplicación de la modulación de ancho de pulso PWM. Para el diseño del control de potencia del sistema de calentamiento se realiza un análisis del hardware y lógica de programación para la implementación con el método seleccionado.

Hardware para Control de Potencia de la Niquelina

En el hardware involucrado en esta fase se tiene en cuenta los elementos necesarios, módulo de salida digital del controlador 1762-OB16, el dispositivo de conmutación a alta frecuencia, relé de estado sólido, el elemento final de control, niquelina; y determinar la disposición física de los mismos.

El relé de estado sólido actúa como un interruptor electrónico el cual puede encender y apagar rápidamente para poder modular la potencia entregada a la carga. Sin embargo, se debe tener en cuenta la capacidad de conmutación, para el dimensionamiento del dispositivo se tiene en cuenta la frecuencia de conmutación del módulo de salida digital 1762-OB16 que es de 1000 [Hz], es decir un tiempo de activación de 1[ms].

En este caso, teniendo en cuenta el hardware que involucra el control de potencia, cada uno de los equipos aportan características técnicas para la selección del relé de estado sólido, en esta oportunidad el seleccionado es de la serie SSR-40DA, cuyos detalles técnicos se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25

Características técnicas para la elección del relé de estado sólido

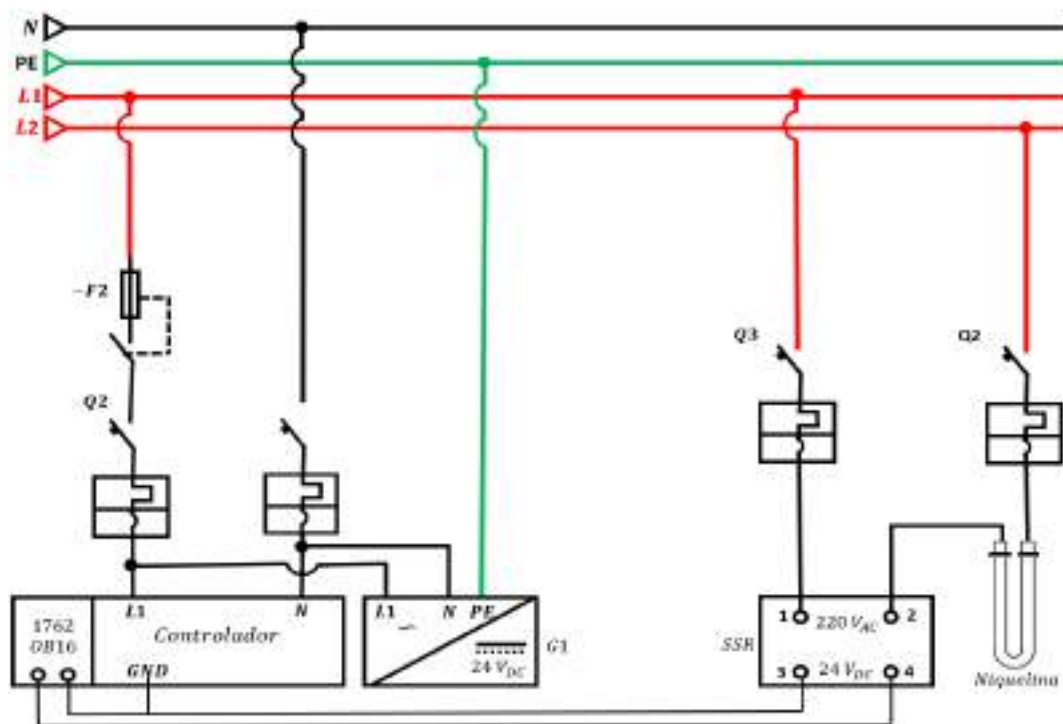
Características	Detalle
Voltaje de Entrada	0-24 [V _{DC}]
Voltaje de Salida	24-380 [V _{AC}]
Corriente de Salida	Al menos 5 [A]
Frecuencia de Conmutación	1000 [Hz]
Tiempo de respuesta	1 [ms] (T _{ON} + T _{OFF}).

Nota. La niquelina proporciona las características técnicas de la corriente y el voltaje de salida del relé de estado sólido que es la alimentación de la niquelina. La salida digital aporta las características técnicas del tiempo de respuesta máxima, así como el rango de voltaje de alimentación del relé que es el voltaje que esta salida entrega.

Como se puede analizar el dispositivo que se ha seleccionado posee la misma frecuencia de conmutación máxima del módulo de salidas digitales 1[kHz], es decir, el dispositivo puede conmutar hasta 1000 veces por segundo; así como la corriente, el voltaje de entrada salida requerida. Una vez seleccionados todos los componentes físicos que requiere para el control de potencia se debe realizar las respectivas conexiones de los equipos, que se presenta en la Figura 18.

Figura 18

Diagrama de conexión del hardware del control de potencia



Nota. En la figura se presenta las conexiones eléctricas de los componentes que se requieren para el control de potencia, donde se observa primeramente los dispositivos de protección.

Lógica de programación del método de modulación de ancho de pulso

El software en el cual se realizará la programación para la generación de pulsos PWM es el software RSLogix Micro. Para implementar el PWM como una parte de la lógica de programación que ejecutará el PLC, se realiza con la ayuda de 2 temporizadores. El primer temporizador establece el tiempo del periodo de la señal, mientras que el segundo temporizador lleva el tiempo del ciclo de trabajo, el cual viene dado por la salida del controlador. El valor de cada temporizador viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Temporizador 1} = T \text{ [ms]}$$

$$\text{Temporizador 2} = DC \text{ [\%]} * \frac{T \text{ [ms]}}{100 \text{ [\%]}}$$

donde:

$T = \text{Periodo}$

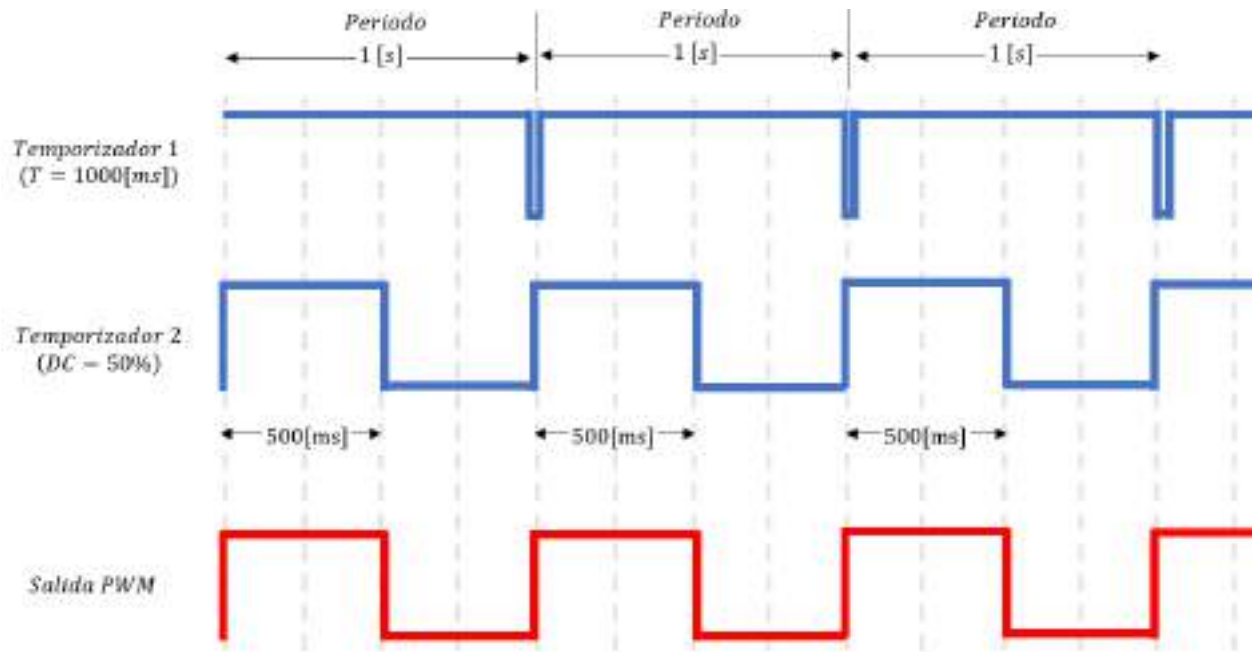
$DC = \text{Duty Cycle o Ciclo de trabajo}$

Por ejemplo, si se desea tener un PWM con un periodo de 1 [s] y un ciclo de trabajo del 50%, el temporizador 1 se configura con un valor de 1000[ms], mientras que el temporizador 2 con un valor de 500[ms].

En la Figura 19 se detalla el funcionamiento de los temporizadores. En este, se observa que cada flanco de desactivación de los temporizadores genera un cambio de estado en la señal PWM, además, la desactivación del temporizador 1 resetea al temporizador 2, así reiniciando su cuenta.

Figura 19

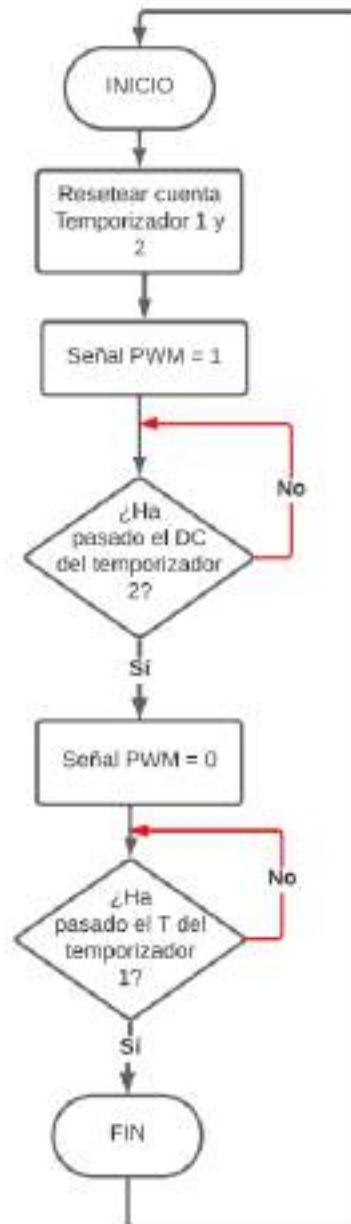
Generación del Pulsos PWM con dos temporizadores.



En la Figura 20 se presenta el diagrama de flujo de la lógica de programación para la generación de la señal PWM en el PLC con el uso de dos temporizadores.

Figura 20

Diagrama de flujo de la lógica de programación para PWM



Para implementar la lógica de programación, se realiza la asignación de recursos que se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26

Tabla de asignación de recursos de tipo Entradas Analógicas

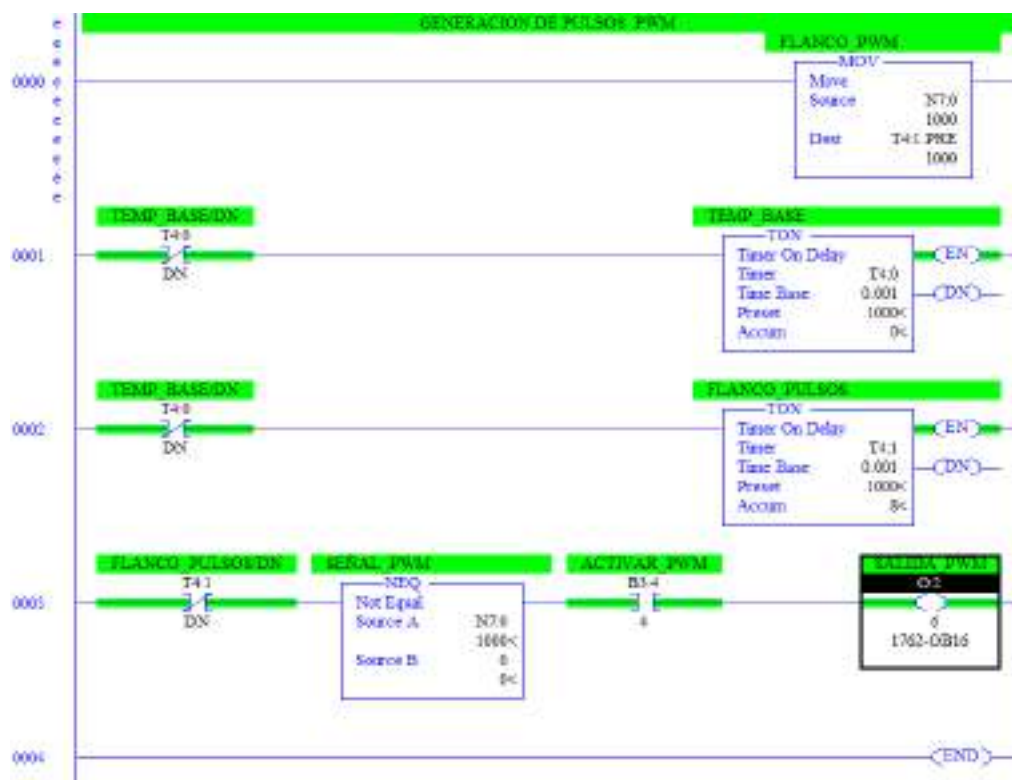
N°	Descripción	Tag	Dirección
1	Escalamiento de la salida del controlador PID de temperatura escalada de 0 a 1000.	Señal_PWM	N7:0
2	Temporizador para el tiempo base establecido de 1 [s]	Temp_Base	T4:0
3	Temporizador para el cambio de estado de la salida PWM.	Flanco_Pulsos	T4:1
4	Señal de comprobación que el sistema se encuentra en condiciones iniciales para permitir la generación de pulsos PWM.	Activar_PWM	B3:4/4
5	Salida digital del automatismo para la señal de activación del relé de estado sólido	Salida_PWM	O:2/6

Nota. En la tabla se presenta la asignación de recursos para la función de generación de pulsos PWM.

La programación realizada se presenta en la Figura 21, en donde se puede observar el periodo de 1000 [ms], donde el parámetro N7:0 es la salida del controlador de temperatura. El rango de salida es de 0 a 1000, donde 1000 representa el 100% en el ciclo de trabajo y 0 el 0%, bajo este concepto, la resolución del ciclo de trabajo es de 0.1 % del periodo.

Figura 21

Subrutina para la generación de pulsos PWM



Nota. En la figura se presenta la subrutina para la señal PWM, con periodo de 1 [s].

Una vez que se ha implementado el control de potencia de la niquelina, se procede a desarrollar e implementar el control de nivel y temperatura de la estación de proceso CTN-1, para lo cual se aborda el modelamiento de las plantas, la sintonización de los controladores, la lógica de programación, así como el diseño de la HMI.

Modelamiento de las Plantas de la Estación de Procesos CTN-1

Para el modelamiento de las plantas se utilizó el método de identificación del sistema que basado en el método de la curva de reacción de procesos donde se realiza la toma de datos de la planta en tiempo real para obtener el comportamiento de esta.

La identificación de sistemas facilita la captura de los datos de entrada-salida de una planta de forma experimental de manera eficiente y exacta. Este proceso tiene los siguientes pasos a seguir.

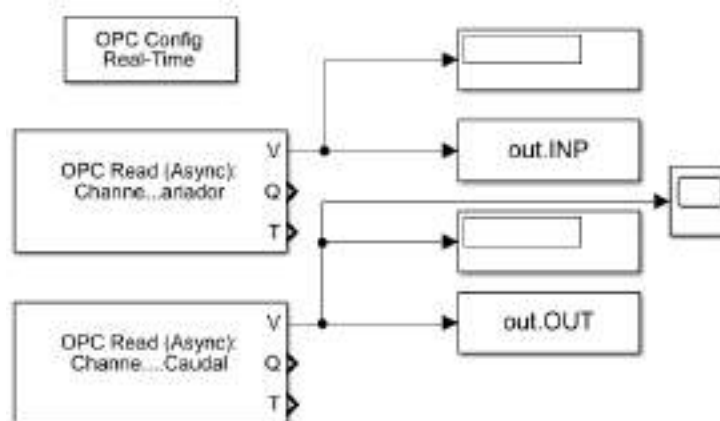
- Registro de datos de entrada - salida
- Tratamiento de los datos registrados (filtros, rangos, etc.)
- Selección de la estructura del modelo de la planta
- Adquisición de los parámetros del modelo

Realizado la identificación de los sistemas se obtuvo los modelos de las plantas bajo estudio con sus curvas y tablas de datos donde se utilizó un análisis de la respuesta temporal donde la entrada es tomada como una señal que usualmente es un impulso o un escalón y de salida se obtiene la respuesta del sistema que ayude a estimar el modelo. Esto se lo realiza con la ayuda de Simulink y KepServer donde mediante una comunicación OPC se obtiene los datos de entrada-salida de la planta en tiempo real.

Se usó el bloque OPC Config Real.Time el cual permite la comunicación entre Simulink y KepServer. Además, se usó el bloque OPC Read donde se asignó la configuración OPC Client del KepServer y se asignó la variable deseada tanto para entrada y salida de los sistemas. Los datos adquiridos se guardaron en un bloque para almacenarse en el Workspace con el nombre asignado OUT como se indica en la Figura 22.

Figura 22

Programación por bloques en Simulink



Identificación de las Plantas de Nivel, Temperatura y Caudal

En la Tabla 27 se realiza la identificación de las tres plantas con sus respectivas entradas y salidas.

Tabla 27

Plantas de la estación CTN-1

Planta	Entrada	Salida
Nivel	Voltaje (0-10VDC) al Variador	Nivel (0 - 35cm) – Sensor ultrasónico
Temperatura	Ciclo de Trabajo (0-100%)	Temperatura (10 - 60°C) – Transmisor de Temperatura
Caudal	Voltaje (0-10VDC) al Variador	Caudal (0 - 55lts/min) - Caudalímetro

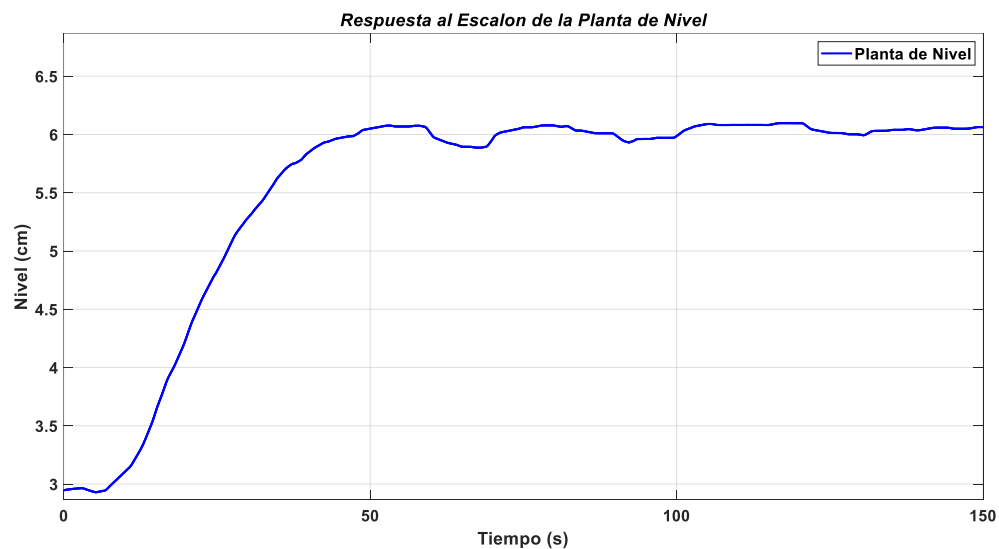
Con los datos en Workspace se trabajó con una aplicación de Matlab - System Identification donde se introduce la entrada (INP) y salida (OUT) cargando los datos del proceso. Luego se realiza la estimación y se selecciona los modelos con mayor porcentaje de estimación.

Planta de Nivel

En la Figura 23 se presenta la respuesta al escalón de la planta de nivel, la cual fue obtenida con la ayuda del software de Matlab.

Figura 23

Respuesta a Escalón de la planta de nivel



En la Tabla 28 se presenta las respuestas estimadas de la FT de la planta de nivel, donde se puede apreciar los resultados obtenidos y el porcentaje de estimación con diferentes combinaciones de polos y ceros.

Tabla 28

Variación de estimaciones del modelo de la planta de nivel

Iteración	Polo	Cero	Estimación [%]
TF1	1	0	77,85
TF2	2	0	87,57
TF3	3	0	87,53
TF4	1	1	78,19
TF5	2	1	87,63
TF6	3	1	87,68

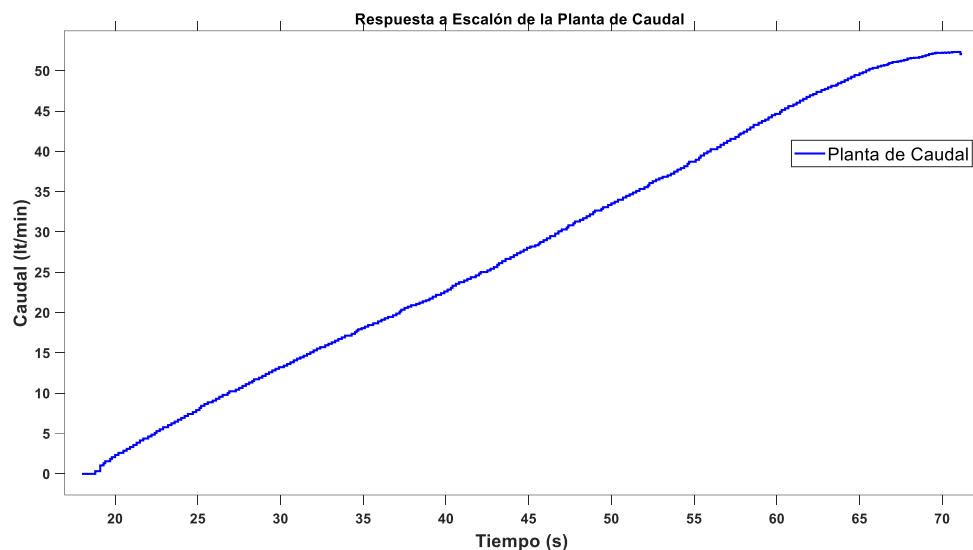
Nota. Con el porcentaje de estimación se descartó a TF1 Y TF3 ya que tienen un valor bajo de estimación, también se tiene valores con una variación no significativa entre el resto de las posibilidades y esto conlleva a elegir la función de transferencia con menor complejidad matemática por lo cual se ha elegido la TF2 al tener un alto porcentaje de estimación y no tener una diferencia mayor al 1% del resto.

Planta de Caudal

En la Figura 24 se presenta la respuesta al escalón de la planta de la planta de caudal la fue obtenida con la ayuda del software de Matlab.

Figura 24

Respuesta a Escalón de la planta de caudal



En la Tabla 29 se presenta la estimación de la planta de caudal, donde se puede visualizar los resultados obtenidos del porcentaje de estimación con diferentes combinaciones de polos y ceros.

Tabla 29

Variación de estimaciones del modelo de la planta de caudal

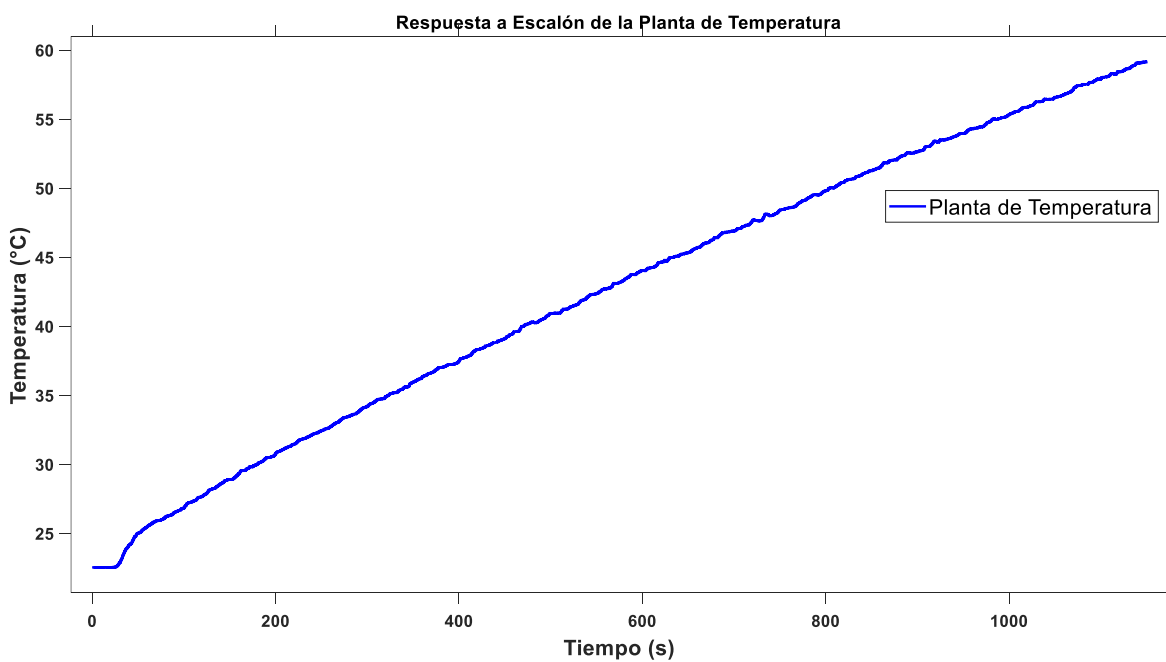
Iteración	Polo	Cero	Estimación [%]
TF1	1	0	91,82
TF2	2	0	92,76
TF3	3	0	94,23
TF4	1	1	91,83
TF5	2	1	92,77
TF6	3	1	94,24

Planta de Temperatura

En la Figura 25 se presenta la respuesta al escalón de la planta de la planta de temperatura la fue obtenida con la ayuda del software de Matlab.

Figura 25

Respuesta a Escalón de la planta de temperatura



Para la planta de temperatura se visualiza en la Tabla 30 los resultados obtenidos del porcentaje de estimación con diferentes combinaciones de polos y ceros.

Tabla 30

Variación de estimaciones del modelo de la planta de temperatura

Iteración	Polo	Cero	Estimación [%]
TF1	1	0	97,94
TF2	2	0	97,94
TF3	3	0	97,95
TF4	1	1	97,94
TF5	2	1	98,14
TF6	3	1	98,66

A manera de resumen se presenta en la Tabla 31 el modelamiento de las plantas que han sido elegidas de las seis iteraciones con el sistema. Se presenta la función de transferencia, los polos, ceros y el porcentaje de estimación.

Tabla 31

Resultados de Modelamiento de la Planta de nivel, caudal y temperatura.

Planta	Función de Transferencia	Polos	Ceros	Estimación (%)
Nivel	$\frac{7.632e - 07}{z^2 - 1.951 z + 0.9521}$	2	0	87.57%
Caudal	$\frac{2.614e - 06}{z - 1}$	1	0	91.88%
Temperatura	$\frac{1.252e - 05}{z - 1}$	1	0	97.94%

Sintonización de las Plantas de la Estación de Procesos CTN-1

Una vez definida la función de transferencia de las plantas, se procede a simular con el software de Simulink para poder analizar el comportamiento en lazo cerrado con y sin las técnicas de control.

Planta de Temperatura

Los requerimientos de diseño del controlador para la planta de temperatura es alcanzar como máximo el 3.5% de sobre impulso ya que los controles temperatura dependiendo la aplicación pueden llegar a ser críticos, perjudicando equipos y productos con variaciones de temperatura no deseadas, también con las dimensiones reducidas que se tiene en el tanque de temperatura se pueda alcanzar un tiempo de subida menor a los 120 segundos, que el tiempo de establecimiento sea menor de 240 segundos y un error en estado estable del +/- 2%.

En la Tabla 32 se presenta el resumen de los criterios de diseño para el controlador de la planta de temperatura.

Tabla 32

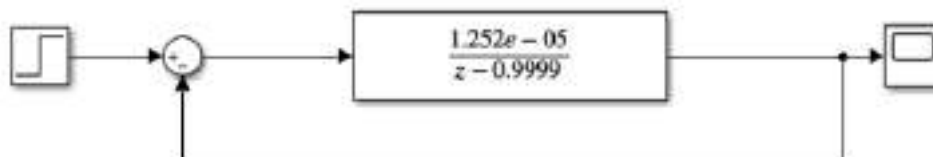
Criterios de Diseño para el control de la planta de temperatura

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
3,5	120	240	2

En Figura 26 se muestra la simulación de la planta de nivel en lazo cerrado para una entrada escalón. Los parámetros de su respuesta se resumen en la Tabla 33

Figura 26

Lazo cerrado de la planta de temperatura.



Nota. En la figura se presenta el diagrama de lazo cerrado de la planta de temperatura con la función de transferencia elegida en la sección anterior.

Tabla 33

Comportamiento de planta de temperatura en lazo cerrado sin controlador

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
0 %	10000 s	20000 s	89 %

Para la sintonización de la planta de temperatura se utiliza el bloque PID Controller al lazo cerrado para realizar una auto sintonización con los criterios planteados, obteniendo los resultados de la Figura 27 donde se observa los comportamientos de las diferentes técnicas de control y sus parámetros para el análisis con relación a los requerimientos planteados de la planta de temperatura.

Figura 27

Simulación del comportamiento de la planta de temperatura



En la Tabla 34 se presentan los parámetros de los controladores para el control de temperatura, mientras que en la Tabla 35 resume el comportamiento de la planta en estado estable y estado transitorio.

Tabla 34

Parámetros de las técnicas de control de Temperatura

Controlador	Ganancia Proporcional	Ganancia Integral	Ganancia Derivativa
P	1412,3	0,0	0,0
PI	1348,7	0,012	0,0
PID	1123,4	0,06	1,82

Nota. Las ganancias del controlador sea solo P, PI, o PID son las que se introducen al bloque de programación del controlador en el PLC.

Tabla 35*Comportamiento de planta de temperatura*

Controlador	Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
P	0	30,8	54,8	0,7
PI	0,94	31	51,8	1
PID	6,4	34	318	0,4

Nota. La tabla presenta el comportamiento de la planta de temperatura en estado transitorio (overshoot y tiempo de subida), así como en estado estable (tiempo de establecimiento y el error en estado estable).

A continuación, se debe realizar un ajuste de los valores obtenidos mediante las ecuaciones que permiten la relación entre las ganancias proporcional, integral y derivativa con los tiempos de integración y derivación con los que trabaja el controlador del Micrologix 1100.

$$Kc = Kp$$

$$Ti = \frac{1}{Ki}$$

$$Td = Kd$$

Los parámetros presentados en la Tabla 36 son aquellos que se ingresan en el bloque de programación del controlador en el PLC con las mismas transformaciones realizadas en la planta de temperatura.

Tabla 36*Valores de los parámetros del controlador*

Parámetro	Control P	Control PI	Control PID
Kc	1412,3	1348,7	1123,4
Ti	0	83,3	16,6
Td	0	0	1,82

Planta de Nivel

Como requerimientos de diseño del controlador para la planta de nivel es alcanzar como máximo el 10% de sobre impulso ya que a los 35cm se podría llegar a obtener desbordamiento causado por el overshoot, también con las dimensiones que se tiene en el tanque se puede alcanzar una entrada de los 18lt/min por lo cual se necesita que el tiempo de subida sea menor a los 30 segundos cada 5cm, que el tiempo de establecimiento sea menor de 120 segundos y un error en estado estable del +/- 2%. En Tabla 37 la se presenta el resumen de los criterios de diseño para el controlador de la planta de temperatura.

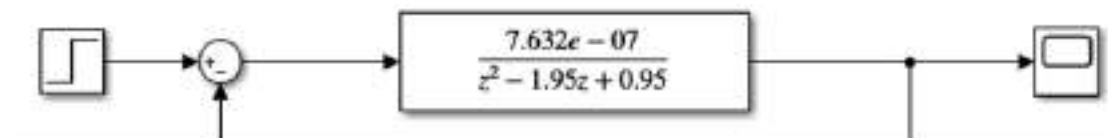
Tabla 37*Criterios de Diseño para el control de la planta de nivel*

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
10	30	120	2

En Figura 28 se muestra la simulación de la planta de nivel en lazo cerrado para una entrada escalón. Los parámetros de su respuesta se resumen en la Tabla 38.

Figura 28

Simulación del sistema en lazo cerrado de la planta de nivel



Nota. En la figura se presenta el diagrama de lazo cerrado de la planta de nivel con la función de transferencia elegida en la sección anterior.

Tabla 38

Comportamiento de planta de nivel en lazo cerrado sin controlador

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
0 %	80000 s	200000 s	0 %

Nota. Con los datos obtenidos de la respuesta de la planta en lazo cerrado no se cumplen los requerimientos en los tiempos de subida y establecimiento para lo cual se implementó técnicas de control P, PI, PID.

Para la sintonización de la planta de nivel se utiliza el bloque PID Controller al lazo cerrado, donde se selecciona la técnica de control (P, PI, PID) y se envió los datos de las plantas al PID Tunner para realizar una auto sintonización hasta llegar a cumplir con los criterios planteados, obteniendo los resultados de la Figura 29.

Figura 29

Simulación del Comportamiento de la planta de Nivel



En la Tabla 39 se puede apreciar los parámetros logrados por el controlador, mientras que en la Tabla 40 se presenta el comportamiento en estado estacionario y transitorio

Tabla 39

Parámetros de las técnicas de control de nivel

Controlador	Ganancia Proporcional	Ganancia Integral	Ganancia Derivativa
P	814,5	0,0	0,0
PI	806,6	0,008	0,0
PID	3034,6	0,019	5,7

Nota. Las ganancias del controlador sea solo P, PI, o PID son las que se introducen al bloque de programación del controlador en el PLC.

Tabla 40

Comportamiento de planta de nivel en estado estacionario y transitorio

Controlador	Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
P	0	33,5	58,2	0
PI	1,6	32,5	52,8	1,2
PID	7,34	10,5	40,8	0

Nota. La tabla presenta el comportamiento de la planta de nivel en estado transitorio (overshoot y tiempo de subida), así como en estado estable (tiempo de establecimiento y el error en estado estable).

A continuación, se debe realizar un ajuste de los valores obtenidos mediante las ecuaciones que permiten la relación entre las ganancias proporcional, integral y derivativa con los tiempos de integración y derivación con los que trabaja el controlador del Micrologix 1100.

$$Kc = Kp$$

$$Ti = \frac{1}{Ki}$$

$$Td = Kd$$

En la Tabla 41 se realiza la transformación de las ganancias (Kp , Ki , Kd) proporcionadas por PID Tuner para que el controlador del PLC Micrologix 1100 donde se integraron estos valores permitan el ingreso de los valores de Ti y Td .

Tabla 41

Valores de los parámetros del controlador nivel al PLC Micrologix 1100

Parámetro	Control P	Control PI	Control PID
Kc	814.5	806.6	3034,6
Ti	0.0	125.0	52.6
Td	0.0	0.0	5,7

Planta de Caudal

Para la planta de caudal se requiere un máximo de 15% de sobre impulso y un tiempo de subida menor a los 60 segundos ya que el flujo es una variable rápida. Además, que el tiempo de establecimiento sea menor de 180 segundos y un error en estado estable del +/- 5% ya que intentar llevar el error a cero puede ocasionar daños tanto en el variador o en la bomba por la variación de voltaje a la entrada. En la Tabla 42 se presenta el resumen de los criterios de diseño para el controlador de la planta de temperatura.

Tabla 42

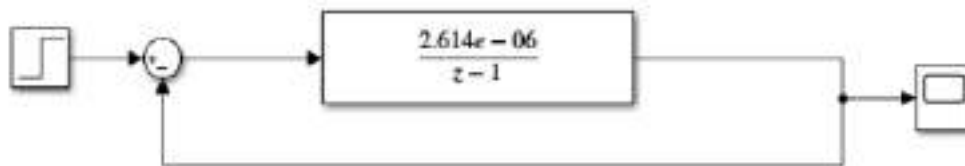
Criterios de Diseño para el control de la planta de caudal

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
15	60	180	5

En Figura 30 se muestra la simulación de la planta de nivel en lazo cerrado para una entrada escalón. Los parámetros de su respuesta se resumen en la Tabla 43.

Figura 30

Lazo cerrado de la planta de caudal.



Nota. En la figura se presenta el diagrama de lazo cerrado de la planta de caudal con la función de transferencia elegida en la sección anterior.

Tabla 43

Comportamiento de planta de caudal en lazo cerrado sin controlador

Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
0 %	400000 s	600000 s	0 %

Nota. Con los datos obtenidos de la respuesta de la planta en lazo cerrado no se cumplen los requerimientos en los tiempos de subida y establecimiento para lo cual se implementó técnicas de control P, PI, PID.

Para la sintonización de la planta de caudal se utiliza el bloque PID Controller al lazo cerrado para realizar una auto sintonización con los criterios planteados, obteniendo los resultados de la Figura 31 donde se observa los comportamientos de las diferentes técnicas de control y sus parámetros para el análisis con relación a los requerimientos planteados de la planta de caudal.

Figura 31

Simulación del comportamiento de la planta de caudal



En la Tabla 44 se puede apreciar los parámetros logrados por el controlador, mientras que en la Tabla 45 el comportamiento de la planta en estado estacionario y transitorio.

Tabla 44

Parámetros de las técnicas de control de caudal

Controlador	Ganancia Proporcional	Ganancia Integral	Ganancia Derivativa
P	1412,3	0,0	0,0
PI	2823	0,001	0,0
PID	1123,4	0,06	1,82

Nota. Las ganancias del controlador sea solo P, PI, o PID son las que se introducen al bloque de programación del controlador en el PLC.

Tabla 45

Comportamiento de planta de caudal en estado estacionario y transitorio

Controlador	Overshoot (%)	Tiempo de Subida (s)	Tiempo de Establecimiento (s)	Error en Estado Estable (%)
P	0	65,8	111	0
PI	1,6	71	114	0,5
PID	9	61	411	1

Nota. La tabla presenta el comportamiento de la planta de temperatura en estado transitorio (overshoot y tiempo de subida), así como en estado estable (tiempo de establecimiento y el error en estado estable).

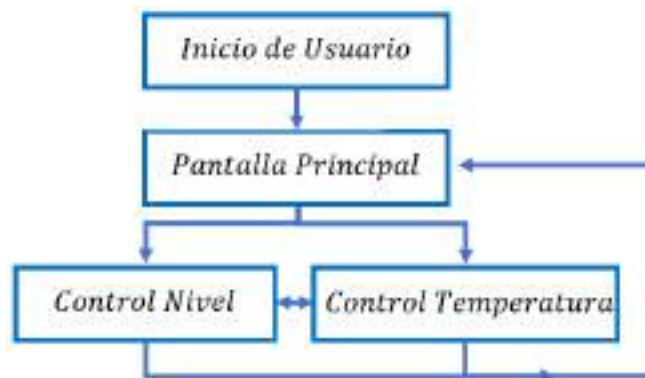
Realizado pruebas de funcionamiento de la planta de caudal se observa el control del sistema, pero el controlador al tratar de eliminar el error existente y realiza variaciones bruscas de voltaje en el variador y así provocando arranques y desaceleraciones en la bomba lo que puede llegar a reducir su vida útil por lo cual se recomienda el uso de una estrategia de control que mejore este comportamiento con el uso de válvulas proporcionales.

Diseño de las pantallas de HMI

El diseño realizado de las pantallas de HMI se hizo mediante el uso del software Ignition Designer, el cual contempla herramientas educativas de desarrollo robusto, así como consideraciones de alto rendimiento. En la Figura 32 se presenta el sistema de navegación de pantallas.

Figura 32

Diagrama de navegación de pantallas HMI



Nota. Se ha desarrollado 4 pantallas, en los cuales se puede navegar entre ellas en sentido vertical, en el último nivel en las pantallas de control se puede navegar en sentido horizontal.

Pantalla de inicio de usuario

En la pantalla de inicio de usuario se valida el usuario accediendo a la información del proceso CTN-1. El Diseño se presenta en la Figura 33.

Figura 33

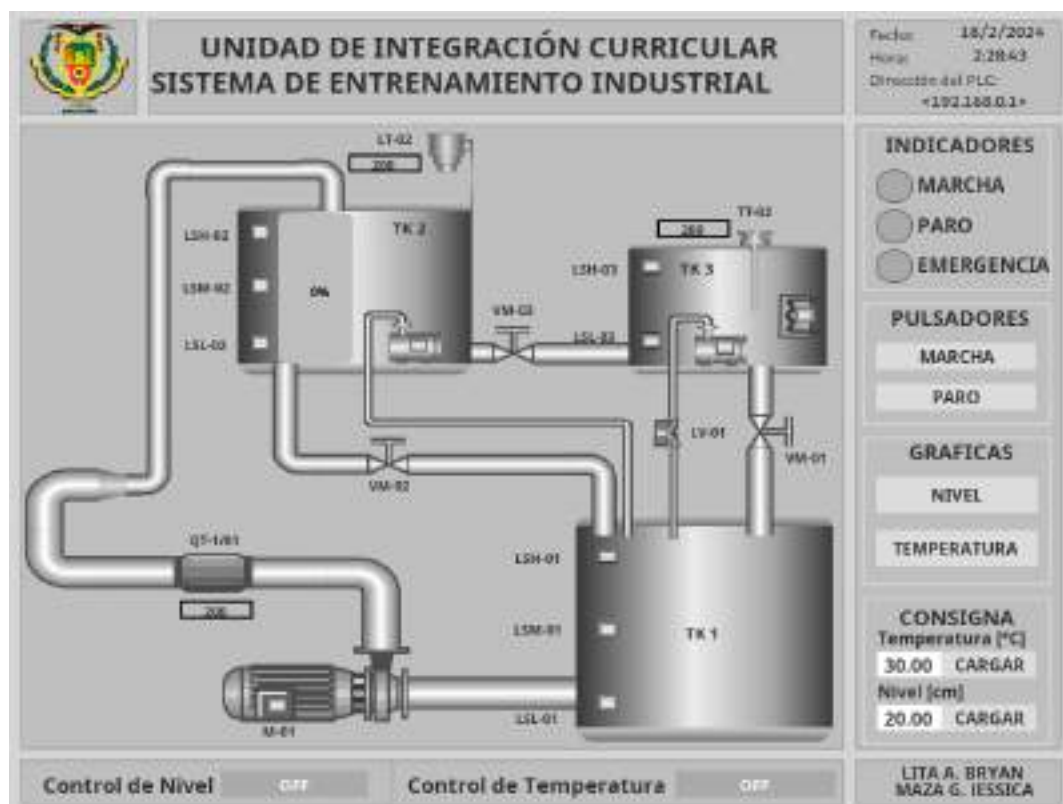
Pantalla de inicio de usuario

**Pantalla Principal**

En la segunda pantalla diseñada para el proceso CTN-1, en la Figura 34 se encuentra el monitoreo y supervisión del sistema de entrenamiento, donde se puede controlar el inicio y paro del sistema, inicio y fin del control, ingreso del set point de nivel y temperatura, así como el acceso a los niveles de control de las variables del proceso.

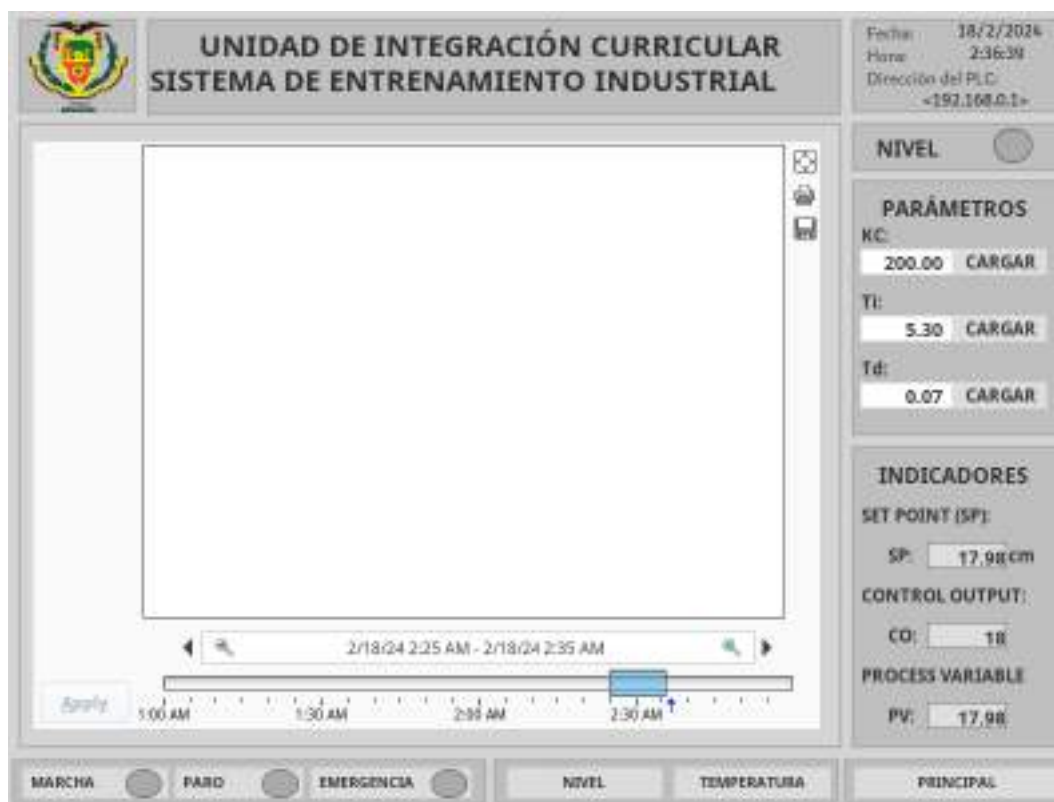
Figura 34

Pantalla Principal del Sistema de Entrenamiento



Pantalla Control de Nivel / Temperatura

En cuanto al diseño de la pantalla de control de nivel que se indica en la Figura 35, se presenta la visualización de la gráfica de los parámetros del control de nivel (set point, variable manipulada, variable controlada), así como para el ingreso de los parámetros del PID (proporcional, integral y derivativo), en este diseño se utilizó la herramienta de easy chart para los históricos de las variables del control de nivel, en una gráfica de variable vs tiempo.

Figura 35*Pantalla de control de nivel*

. Para la pantalla de control de temperatura se presenta en la misma estructura de la pantalla de control de nivel, como se indica en la Figura 36, donde para acceder a esta pantalla se puede ingresar tanto con navegación vertical, desde la pantalla principal, así como navegación horizontal, desde la pantalla de control de nivel.

Figura 36

Pantalla de control de temperatura



Puesta en Marcha

En este apartado se presenta la puesta en marcha del proceso, para cual se realiza la comprobación de funcionamiento.

Para la implementación del proceso, se realiza la conexión de los equipos tras haber realizado un levantamiento del hardware que se encuentra instalado en el sistema, en la Figura 37 se puede observar la conexión de las entradas, salidas del PLC.

Figura 37

Conexión de las entradas, módulos y salidas del PLC.

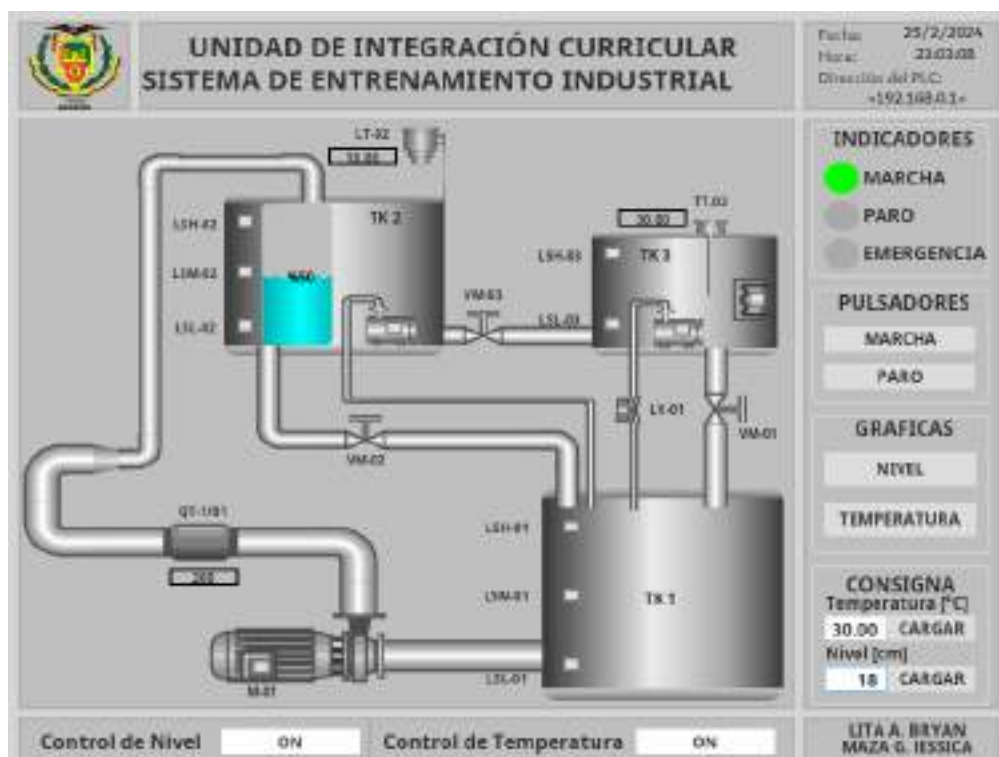


Nota. En la figura se presenta de fondo la estación de procesos CTN-1 sin las conexiones realizadas, así como las conexiones realizadas en cada una de las secciones señaladas, para realizarlo se desenergizó el sistema y se comprobó continuidad en cada una de las borneras de entrada y salida del PLC con los dispositivos.

Una vez que las conexiones eléctricas entre el sistema han sido implementada y comprobada, se alimentó el sistema de entrenamiento para poner en marcha el automatismo, dando inicio de manera remota que permite la HMI poniendo en funcionamiento el sistema, como indica la Figura 38.

Figura 38

Funcionamiento visto desde la interfaz HMI



Nota. En la fotografía se presenta el funcionamiento del automatismo, la luz verde de marcha se activa, siendo un indicativo que el sistema no presenta anomalías y se encuentra en proceso de control de las variables de temperatura / nivel.

El sistema de entrenamiento realiza el control de temperatura y de nivel, mediante el uso del HMI se puede visualizar el funcionamiento del sistema, así como el monitoreo de las variables de cada proceso, como se puede observar en la Figura 39.

Figura 39

Pantalla de control de temperatura

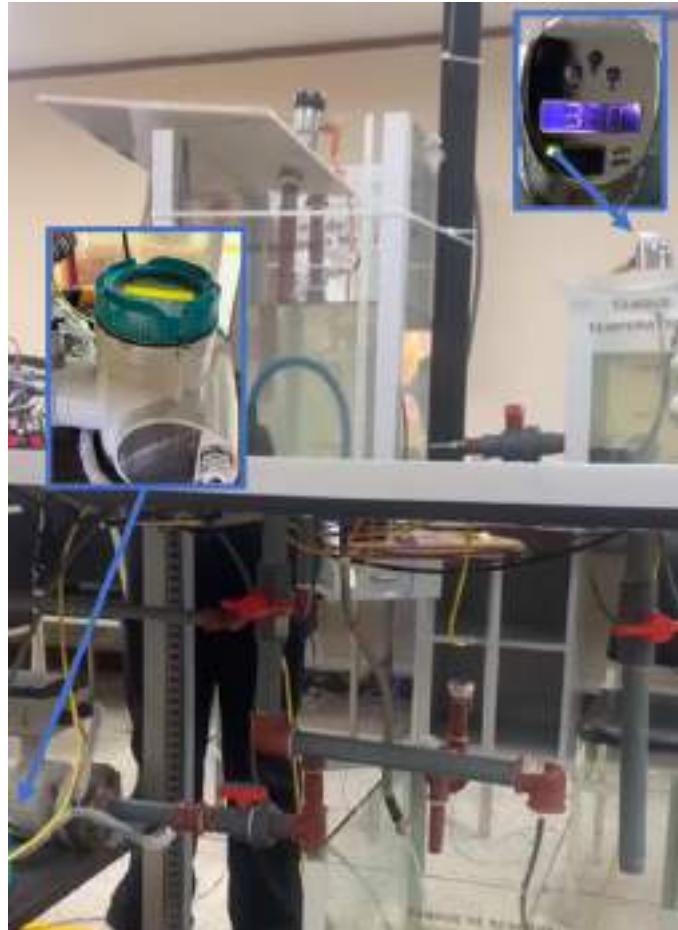


Nota. En la figura se presenta la pantalla de control de temperatura donde se visualiza las variables del proceso (variable manipulada, controlada y set point) así como el indicador de funcionamiento del control y que el funcionamiento no se encuentra con anomalías.

El sistema de entrenamiento realiza el control de nivel y temperatura de manera independiente. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que el tanque de nivel cuenta con una bomba sumergible que se encuentra activa, manteniendo una salida de flujo constante. En la Figura 40 se observa la lectura de las variables del sistema de entrenamiento.

Figura 40

Lectura de variables del sistema de entrenamiento



Nota. en la figura se presenta la activación de la bomba sumergible en el tanque de nivel, así como la lectura de las variables de caudal, temperatura que se puede tener al ser dispositivos indicadores.

Capítulo IV. Pruebas y Resultados

En el capítulo se presenta las pruebas realizadas en el sistema de entrenamiento donde se lleva a cabo una serie de pruebas de conectividad, el planteamiento y evaluación de las guías de laboratorio, así como el plan de mantenimiento, las cuales se presentan en esta sección.

Pruebas de Conectividad

En este tipo de automatismos las pruebas de conectividad son esenciales para establecer el correcto envío y recepción de información entre el controlador lógico programable y el HMI, entre el controlador y los instrumentos de medición y actuadores.

Pruebas con PLC – Computador

En la prueba de conectividad entre el PLC y el computador se realiza en el software RSlinx Classic, en donde se comprueba la conexión vía ethernet que se encuentre operativa mediante el protocolo TCP/IP. Los resultados de la prueba se lo pueden comprobar en la Figura 41.

Figura 41

Prueba de conectividad entre PLC y Computador



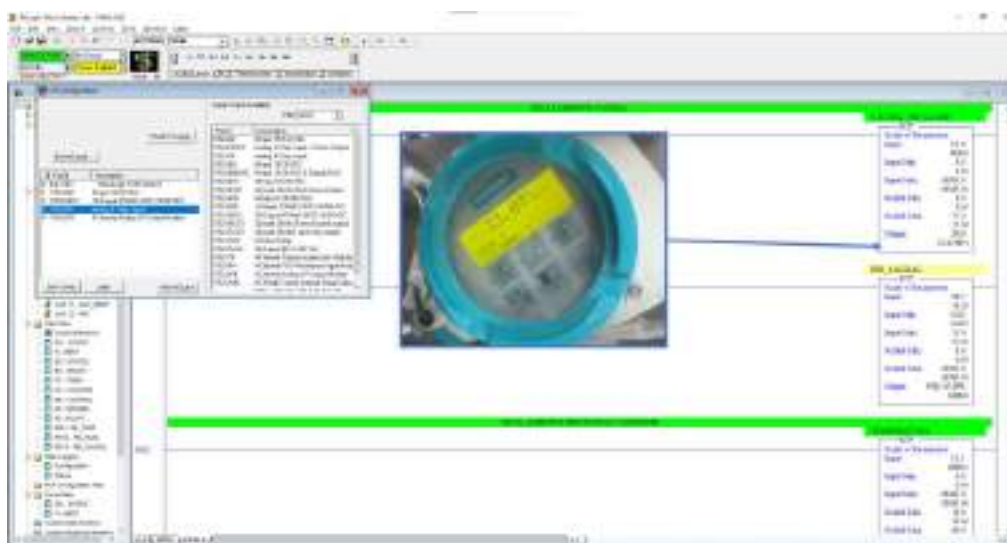
Una forma de comprobar que el computador y el PLC se encuentre en la misma red se puede utilizar la ventana de comandos, con el comando ping – t y la dirección del PLC 192.168.0.1. La conexión entre el PLC y el computador es estable, donde no se encuentran pérdidas de paquetes de información, se debe tener en cuenta que el ordenador se debe encontrar en la misma red del PLC para que exista conexión.

Pruebas con PLC – Instrumentos de medición y actuación

La prueba de conexión entre el PLC y los instrumentos de medición y actuación se comprueba mediante el software de RsLogix Micro 500 estando en modo Online con el PLC, en donde se puede visualizar en tiempo real las variaciones de los sensores, actuadores según la lógica de programación. Como se indica en la Figura 42; en el caso de los elementos finales de control, actuadores, se puede forzar su salida en tiempo real para poder observar en el proceso la activación o desactivación de este.

Figura 42

Prueba con la comunicación con los dispositivos de medición



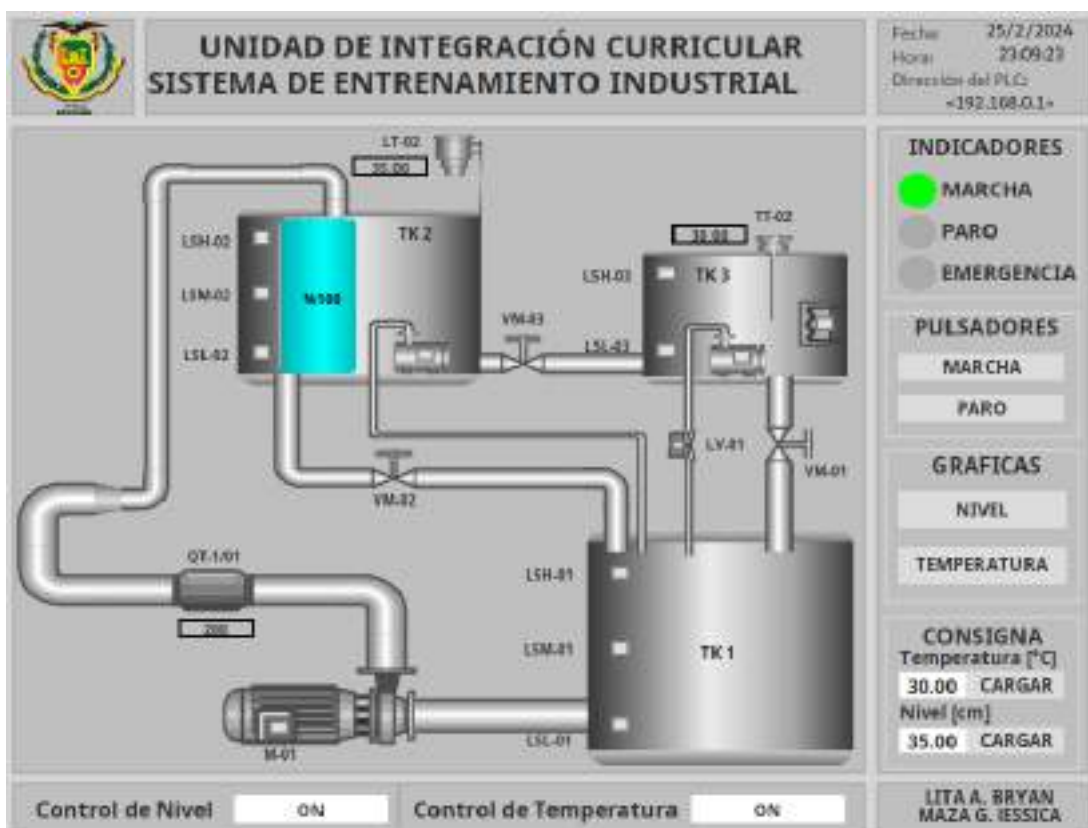
Estando en línea el PLC en el software de programación se puede observar la activación de los actuadores, así como la lectura de las variables del proceso en tiempo real en la variable del PLC que se haya guardado el valor previamente escalado, para las entradas analógicas de 4 a 20 mA se tiene un escalamiento de 14 bits (0-16383).

Pruebas con PLC – HMI

En las pruebas de conectividad entre el PLC y la HMI, se puede verificar desde el servidor local (localhost: 8088) se puede evidenciar la correcta configuración del drive de comunicación, como se puede visualizar la siguiente ilustración, Figura 43.

Figura 43

Pruebas con PLC – HMI



La comunicación entre el computador y la HMI tiene una duración máxima de 2 horas ya que el servidor de Ignition cuenta con ese tiempo gratis de 2 horas, posterior a ello se debe volver a iniciar sesión y resetear el tiempo límite para que el funcionamiento del HMI vuelva a funcionar.

Pruebas de Funcionamiento

En esta sección se presenta las pruebas de funcionamiento de la etapa de potencia y las pruebas para la medición y control de las variables de proceso de la estación.

Pruebas de funcionamiento del Control de Potencia

Para las pruebas de funcionamiento del control de potencia implementado se realiza el análisis de los tiempos de conmutación, lo cual se resume en la Tabla 46, donde se analiza el valor entregado por la salida del controlador PID, por lo que se toma los valores de los extremos para analizar los casos críticos.

En el caso del ciclo de trabajo de 99.9% que es el caso más crítico se tiene un tiempo de conmutación de 1[ms] que se encuentra dentro del tiempo de conmutación que presenta el relé de estado sólido y el módulo de salidas digitales los cuales eran los que presentaban las limitaciones.

Tabla 46*Ciclo de trabajo y tiempo de conmutación necesaria*

Valor entregado por N7:0	Ciclo de trabajo	Tiempo de Conmutación
0	0 %	0 [s]
1	1 %	0.01 [s]
2	2 %	0.02 [s]
980	98 %	0.02 [s]
999	99.9 %	0.001 [s]
1000	100 %	0[s]

Nota. El tiempo de conmutación necesaria se basa en el periodo de 1000 [ms], en base a esto se analiza el tiempo de conmutación, que es el tiempo que se necesita para cambiar de estado.

El relé de estado sólido puede conmutar hasta 1000 veces por segundo, al igual que el módulo de salida digital, los datos críticos analizados se encuentran dentro del tiempo máximo de conmutación. Por ejemplo, cuando el ciclo de trabajo es de 99.9 %, requiere un tiempo de conmutación de 1 [ms] para cambiar de estado.

Pruebas de Medición de Temperatura

Las pruebas se han realizado con la toma de 10 datos por la variable de temperatura, tomando en cuenta el valor de la temperatura medida por el transmisor, así como el indicado en la interfaz HMI, con lo cual se obtiene el error dinámico presentado en la Tabla 47.

Tabla 47

Pruebas de medición de temperatura

Medición	Visualización Transmisor Temperatura [°C]	Visualización HMI Temperatura [°C]	Error Dinámico [°C]
1	29.9	29.84	0.06
2	22.3	22.36	0.03
3	23.1	23.08	0.02
4	38.4	38.36	0.04
5	40.6	40.65	0.10
6	43.7	43.72	0.06
7	47.0	47.08	0.10
8	36.7	36.66	0.08
9	49.3	49.31	0.02
10	21.2	21.26	0.06
Error Dinámico Promedio [°C]			0.06

Nota. La tabla indica la toma de 10 mediciones de la variable de temperatura, las cuales tienen un error dinámico de 0.06 °C, con lo cual se puede evidenciar como el sensor tiene una linealidad alta.

La prueba de medición de la variable de temperatura se realiza con 10 mediciones, la prueba posee un error dinámico de 0.06 °C. Las pruebas han sido realizadas dentro del rango de operación de esta variable que han sido definidas previamente en el diseño de 10 a 60 °C.

Pruebas de Medición de Caudal

Las pruebas se han realizado con la toma de 10 datos por la variable de caudal, con la visualización del caudal que indica el transmisor indicador, así como la visualización que presenta el HMI, con lo cual se procede a calcular el error dinámico presentado en la Tabla 48.

Tabla 48

Pruebas de Medición de Caudal

Medición	Visualización Transmisor Caudal [l/min]	Visualización HMI Caudal [l/min]	Error Dinámico [l/min]
1	3.55	3.42	0.13
2	5.88	5.60	0.28
3	9.42	10.12	0.70
4	11.59	11.75	0.16
5	14.96	15.09	0.13
6	19.42	19.85	0.43
7	21.85	22.03	0.18
8	26.13	26.35	0.22
9	28.54	28.84	0.30
10	33.07	33.12	0.05
Error Dinámico Promedio [l/min]			0.258

Nota. La tabla indica la toma de 10 mediciones de la variable de caudal, las cuales tienen un error dinámico de 0.258 °C.

La prueba de medición de la variable de caudal se realiza con 10 mediciones, la prueba posee un error dinámico de 0.258 [l/min]. Las pruebas han sido realizadas dentro del rango de operación de esta variable que han sido definidas previamente en el diseño de 0 a 55 [l/min]. El error dinámico promedio viene dado con el tiempo de respuesta del caudalímetro ante los cambios que se han realizado en el caudal.

Pruebas de Medición de Nivel

Las pruebas se han realizado con la toma de 15 datos por la variable de nivel, tomando en cuenta la medición de la escala que presenta el tanque, el valor indicado en la HMI, con lo cual se procede a calcular el error absoluto presentado en la Tabla 49.

Tabla 49

Pruebas de medición de nivel

Medición	Visualización Real del Nivel [cm]	Visualización HMI Nivel [cm]	Error Absoluto
1	4.00	4.35	8.75%
2	7.00	7.23	3.29%
3	9.00	9.17	1.89%
4	12.00	12.08	0.67%
5	16.00	16.03	0.19%
6	19.00	19.08	0.42%
7	21.00	21.02	0.10%
8	24.00	24.01	0.04%
9	25.00	25.00	0.00%
10	27.00	27.12	0.44%
11	29.00	29.23	0.79%
12	30.00	30.03	0.10%
13	33.00	33.34	1.03%
14	34.00	34.38	1.12%
15	15.00	15.13	0.87%
Error Absoluto Promedio [%]			1.31%

Nota. La tabla indica la toma de 15 mediciones de la variable de nivel, las cuales tienen un error absoluto de 1.31%, lo cual representa un 1.31 [cm].

La prueba de medición de la variable de nivel se realiza con 15 mediciones, la prueba posee un error absoluto de 1.31 [%]. Las pruebas han sido realizadas dentro del rango de operación de esta variable que han sido definidas previamente en el diseño de 0 a 35 [cm]. Se

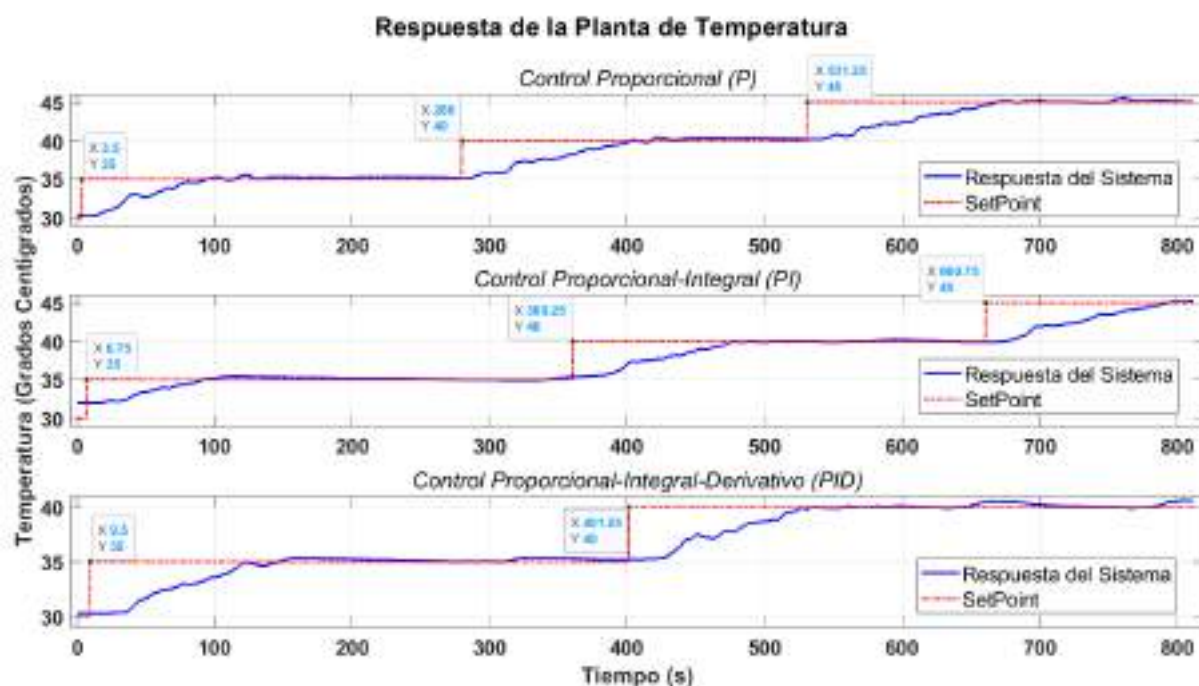
debe tener en cuenta que el sensor industrial tiene un rango de medición de hasta 10 [m] y para la aplicación realizada se utiliza en tan solo el 3.5% de su capacidad de medición, así como, la respuesta del sensor no es lo suficientemente rápida para detectar las mínimas variaciones que tiene el sistema.

Prueba de funcionamiento Control de Temperatura

En la Figura 44 se presenta el comportamiento de la planta según los diferentes controladores implementados para la variable de temperatura ante la variación de diferentes sets point en el rango de 30 a 55 [°C]. Se observa el comportamiento de las diferentes técnicas de control donde se evidencia la estabilidad del sistema.

Figura 44

Respuesta de la Planta de Temperatura con los diferentes controladores



En la Tabla 50 se presenta la comparación de las técnicas para determinar cuál es la más apropiada para este sistema.

Tabla 50

Comparación de las técnicas de control

Técnica de Control	Consignas (°C)	Pico (°C)	Tiempo de Establecimiento (s)	Temperatura Max en estado estable °C	Temperatura Min en estado estable °C	Error en estado estable (%)
P	45	45,6	150	45,18	44,8	+0,4/-0,44
PI	45	45,3	130	45,1	44,88	+0,22/-0,26
PID	45	45,5	120	45,5	44,75	+1,11/-0,55

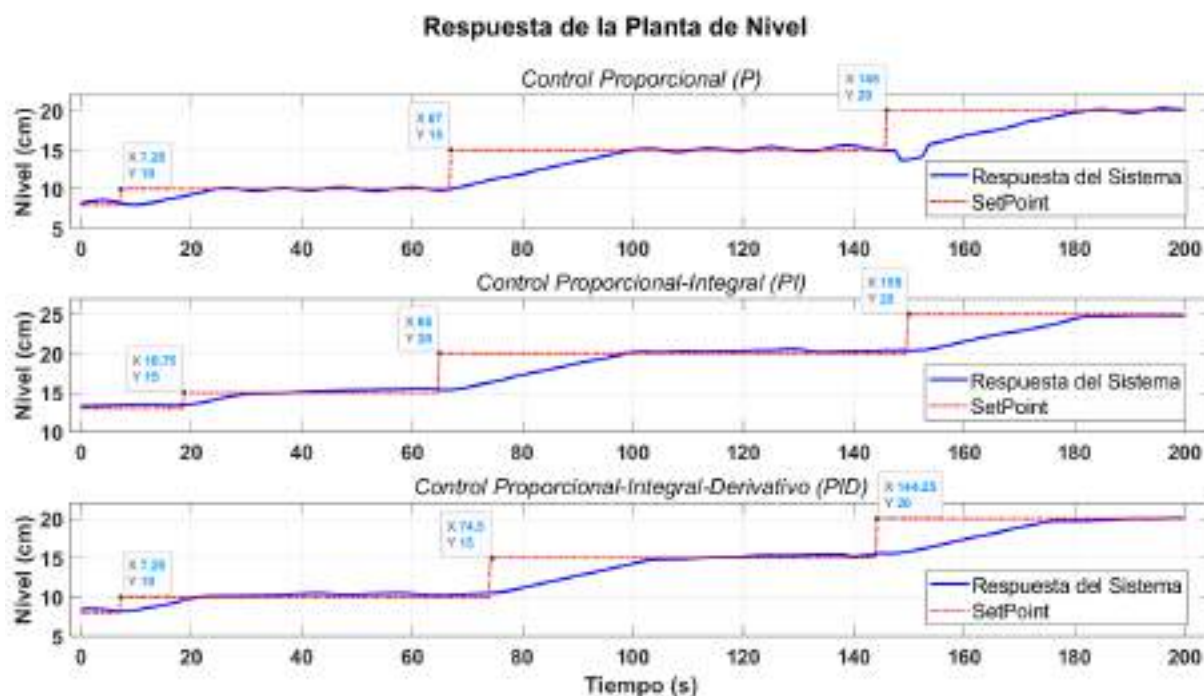
Nota. Los datos presentados se han obtenido de las diferentes técnicas de control se puede apreciar que se tiene un control con menos overshoot y menos error en estado estable en el controlador tipo PI.

Prueba de funcionamiento Control de Nivel

En la Figura 45 se presenta el comportamiento de la planta según los diferentes controladores implementados para la variable de nivel ante la variación de diferentes sets point realizados 10, 15, 20, 25 [cm]. Se observa el comportamiento de las diferentes técnicas de control donde se evidencia la estabilidad del sistema, a breves rasgos se observa pequeñas oscilaciones en el estado estable en el controlador P, comportamiento inverso al controlador PI el cual no las presenta.

Figura 45

Respuesta de la Planta de Nivel con los diferentes controladores



En la Tabla 51 de comparación de estas técnicas para determinar cuál es la más apropiada para este sistema.

Tabla 51

Comparación de las técnicas de control en la variable de nivel

Técnica de Control	Consignas (cm)	Pico (cm)	Tiempo de Establecimiento (s)	Nivel Max en estado estable (cm)	Nivel Min en estado estable (cm)	Error en estado estable (%)
P	25	25,4	30	25,3	24,6	+1,2/-1,6
PI	25	24,8	35	25,2	24,8	+0,8/-0,8
PID	25	24,99	38	25,08	24,9	+0,3/-0,4

Nota. Obtenidos los datos de las diferentes técnicas de control se puede apreciar que se tiene un control con menos overshoot y menos error en estado estable en el controlador tipo PID.

Estrategias de Control en la Estación de Procesos CTN-1

La estación de procesos CTN-1, ha sido implementada con el fin de ampliar el campo de formación académica en la parte práctica para los estudiantes de las materias de instrumentación industrial y control de procesos. Uno de los campos de estudio de control de procesos son las estrategias de control tales como de cascada y selectivo.

El presente trabajo de titulación propone el planteamiento de estrategias de control en el proceso 1 y proceso 2 para trabajos futuros.

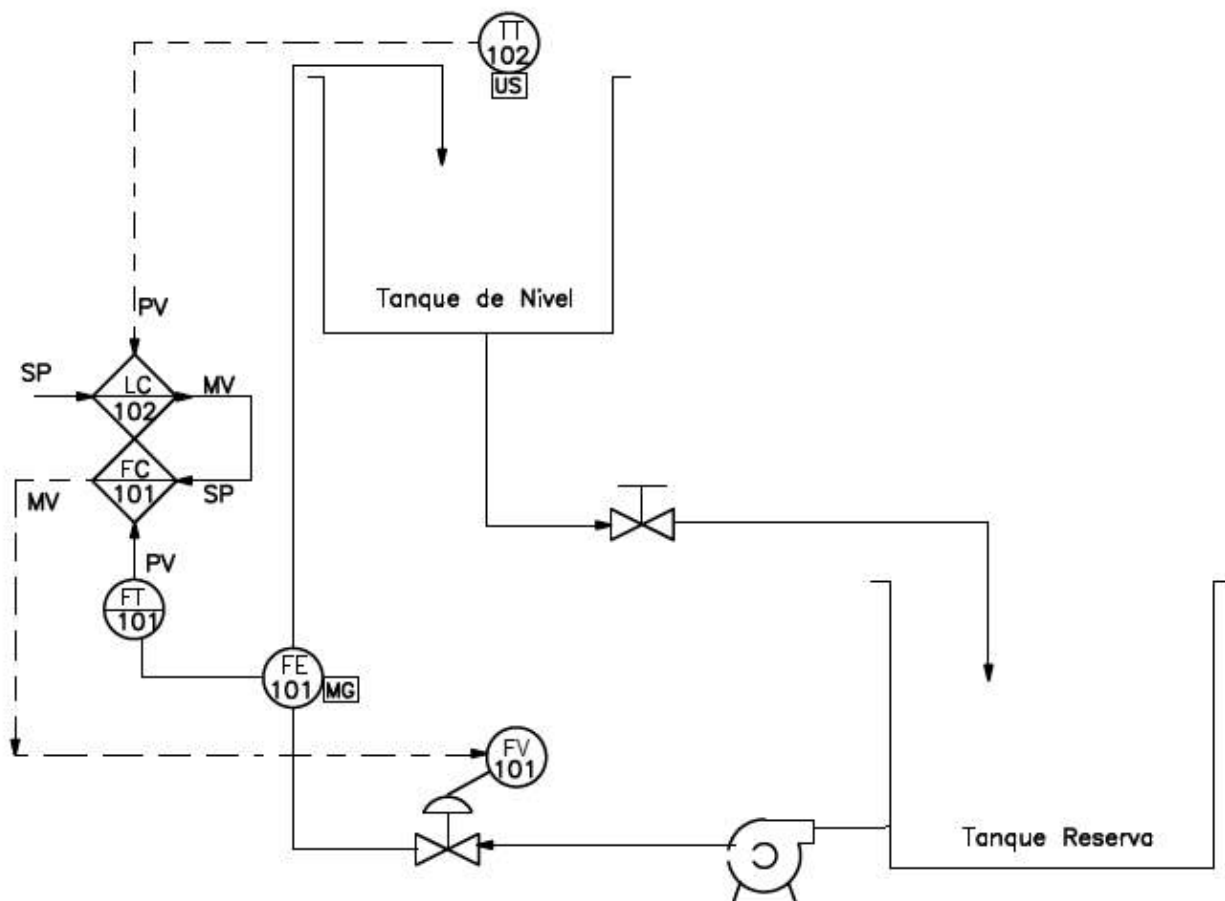
Estrategia de Control en Cascada en el Proceso 1

En el proceso 1 se aplica una estrategia de control en cascada en base al nivel del tanque TN, en donde para controlar el nivel del tanque se lo realiza mediante la actuación sobre el caudal de entrada, que pasa por la válvula proporcional FV, como se presenta en la Figura 46. En donde se puede evidenciar las dos etapas que posee el proceso, la etapa 1 que es el control de nivel que posee una relación lenta, y la etapa 2 es el control de la válvula donde se tiene el caudal de salida y la entrada es la apertura de la válvula.

Para ello, se analiza dos posibles relaciones mediante las cuales se puede realizar el control en cascada. La relación que existe entre la abertura de la válvula proporcional y el caudal que existe es una relación alta, por otro lado, se tiene también la relación que existe entre el caudal que circula y el aumento del nivel del tanque posee una relación lenta.

Figura 46

Estrategia de Control en Cascada en el Proceso 1



Por lo tanto, para poder implementar el control en cascada en este proceso se requiere la instalación de los equipos detallados en la Tabla 52.

Tabla 52*Hardware para la estrategia de control en cascada*

Dispositivo	Función
Transmisor de Nivel	Medir el nivel del tanque
Controlador	Calcular la señal de control del proceso
Variador de Frecuencia	Controla la velocidad de la bomba para ajustar el flujo de entrada del tanque de nivel
Válvula de control	Regular la salida del flujo del tanque de nivel
Caudalímetro	Medir el caudal que ingresa al tanque, ubicado posterior a la válvula de control.
Bomba	Controlar el flujo de entrada al tanque de nivel

Nota. La tabla proporcionada describe el control de nivel por bombeo para la cual no se necesita un transmisor de caudal, para lo cual se utiliza variador de frecuencia para controlar la velocidad del bombeo del líquido, ajustando así el flujo de entrada al tanque.

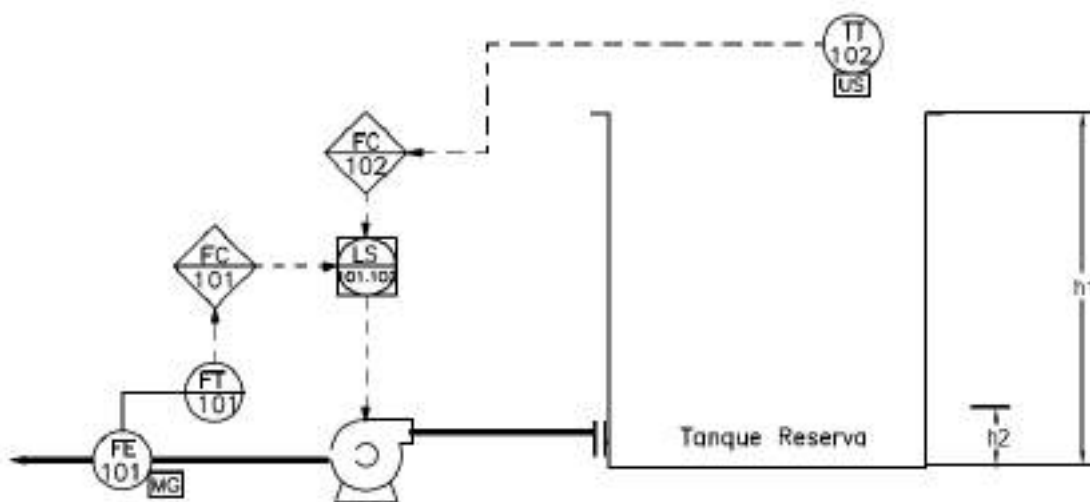
Estrategias de Control Selectivo

Se presenta un sistema de control para evitar la situación de riesgo en el que el tanque de reserva llegue al límite inferior de nivel produciendo el fenómeno de cavitación, donde se puede dañar la bomba. El tanque de reserva cuenta con una altura máxima de 45 [cm].

En la Figura 47 se observa el nivel máximo (h_1) y el nivel mínimo (h_2) del tanque de reserva. En este método que se desea implementar, se tiene dos controladores de nivel y de caudal los cuales controlan una bomba BC. En el lazo planteado el FC trabaja en acción inversa y LC en acción directa.

Figura 47

Estrategia de control selectivo en el tanque de reserva



Para la implementación del control selectivo en el tanque de reserva, se requiere la instalación de los equipos detallados en la Tabla 53.

Tabla 53

Hardware para la implementación de estrategia de control selectivo

Dispositivo	Función
Transmisor de nivel	Medir el nivel del tanque de reserva
Caudalímetro	Medir el caudal posterior a la bomba centrífuga principal.
Bomba	Controlar el flujo de salida del tanque de reserva

Nota. La tabla describe los equipos requeridos para la implementación del control selectivo como seguridad para la bomba centrífuga.

Guías de Laboratorio

Los estudiantes de la carrera de Electrónica y Automatización en de su malla curricular cumplen con dos materias, Control de Procesos e Instrumentación Industrial, en las que se puede utilizar la estación de procesos CTN-1 como parte de su formación profesional, para lo cual se han desarrollado guías de laboratorio para dichas materias.

Guía Laboratorio 1

La guía de laboratorio 1, para la materia de instrumentación Industrial, ha sido implementada con el tema de “Identificación y ubicación de elementos utilizando P&ID”, la cual se presenta en el apéndice 6.

Para evaluar y recopilar información sobre la experiencia de los estudiantes se realizó una encuesta conformada por 5 preguntas, cuyas respuestas se han analizado con el propósito

de identificar los resultados obtenidos, las preguntas realizadas se presentan en la Tabla 54, donde se visualiza las preguntas realizadas, así como el rango de 1-10 de calificación y marcando los valores de los extremos para cada una de ellas.

Tabla 54

Cuestionario de evaluación de la guía de laboratorio 1

	Pregunta	Rango	Significado del Valor Mínimo	Significado del Valor Máximo
P1	¿Los pasos realizados en la guía de laboratorio que nivel de dificultad se le presentó?	1-10	Muy Difícil	Muy Fácil
P2	¿En el hardware y software utilizado en la guía de laboratorio que nivel de dificultad se le presentó?	1-10	Muy Difícil	Muy Fácil
P3	¿En base a los conocimientos teóricos impartidos que nivel de dificultad se presentó para identificar los componentes del diagrama P&ID?	1-10	Muy Difícil	Muy Fácil
P4	¿En base a los diagramas P&ID cree que esta representación presenta información suficiente para comprender a detalle el proceso?	1-10	No proporciona información útil	Proporciona información útil de los elementos que compone el proceso
P5	¿En base a la práctica realizada, cree que ha sido una ayuda para mejorar la comprensión e interpretación de los diagramas P&ID?	1-10	No se adquirió conocimiento	Amplíe mi base de conocimientos técnicos

En base a las preguntas, se procede a analizar los resultados obtenidos de los 16 estudiantes que se encuentran actualmente tomando la materia de Instrumentación Industrial, las cuales se analizan en la Tabla 55. Para analizar la respuesta, se analiza el rango de respuestas, donde, 1 es Deficiente, 2-4 Regular, 5-7 Bueno y 8-10 Satisfactorio,

Tabla 55

Análisis de resultados de cada pregunta planteada

Pregunta	Regular		Bueno		Satisfactorio	
	Estudiante	Porcentaje	Estudiante	Porcentaje	Estudiante	Porcentaje
P1	1	6.25%	6	37.50%	9	56.25%
P2	1	6.25%	7	43.75%	8	50.00%
P3	1	6.25%	5	31.25%	10	62.50%
P4	0	0.00%	5	31.25%	11	68.75%
P5	0	0.00%	3	18.75%	13	81.25%
Promedio General		3.75%		32.5%		63.75%

Nota. La valoración de 1 (deficiente) ha sido suprimida de la tabla final ya que no presentaba ningún resultado de algún estudiante.

Como se observa en los resultados presentados, el 90% de las respuestas se concentran en la categoría de Bueno y satisfactorio, teniendo un gran porcentaje en cada una de las preguntas en la categoría de satisfactorio, con lo cual se puede establecer que la

mayoría de los estudiantes poseen una perspectiva positiva sobre el aporte realizado en la guía de laboratorio. Sin embargo, se presenta un porcentaje de 6.25% en la categoría de regular, donde las preguntas P1, P2 Y P3, cuentan con un 1 voto en esta categoría, al ser una pregunta subjetiva sobre los logros alcanzados, valorizados en (muy difícil – muy fácil), se puede analizar que la práctica puede mejorar en la parte teórica y en el detalle en el que se le desglosa a la actividad para alcanzar mayor facilidad hacia los estudiantes para el entendimiento de los diagramas P&ID así como el análisis de elementos que componen un proceso de producción.

Guía Laboratorio 2

La guía de laboratorio 2, para la materia de instrumentación Industrial, ha sido implementada con el tema de “Uso, Software y calibración del sensor ultrasónico y caudalímetro”, la cual se presenta en el apéndice 7.

Para evaluar y recopilar información sobre la experiencia de los estudiantes al momento que se implementó la guía de laboratorio se realizó una encuesta conformada por 5 preguntas, cuyas respuestas se han analizado con el propósito de identificar los resultados obtenidos, las preguntas realizadas se presentan en la Tabla 56, donde se visualiza las preguntas realizadas, así como el rango de 1-10 de calificación y marcando los valores de los extremos para cada una de ellas.

Tabla 56*Cuestionario de evaluación de la guía de laboratorio 1*

	Pregunta	Rango	Significado del Valor Mínimo	Significado del Valor Máximo
P1	¿Los pasos realizados en la guía de laboratorio que nivel de dificultad se le presentó?	1-10	Muy Difícil	Muy Fácil
P2	¿El tiempo establecido para cumplir con los objetivos de la práctica ha sido suficiente?	1-10	El tiempo estimado ha sido limitado	El tiempo estimado ha sido adecuado.
P3	¿La información proporcionada en la guía sobre los sensores industriales, permitió comprender el funcionamiento de los mismos?	1-10	Información insuficiente	Información relevante y significativa
P4	¿La información proporcionada sobre la configuración de los sensores ha sido completa y sistemática?	1-10	La guía abordó conceptos ineficientes relacionados con la configuración de los equipos	La guía abordó conceptos completos y comprensibles relacionados con la configuración de los equipos
P5	¿De acuerdo a la información de equipos industriales, cómo evaluaría la configuración de estos?	1-10	No se adquirió conocimiento	Amplíe mi base de conocimientos técnicos

En base a las preguntas planteadas y las escalas de las respuestas, se procede a analizar los resultados obtenidos de los 16 estudiantes que se encuentran actualmente tomando la materia de Instrumentación Industrial, las cuales se analizan en la Tabla 57. Para

analizar la respuesta, se analiza el rango de respuestas, donde, 1 es Deficiente, 2-4 Regular, 5-7 Bueno, 8-9 Muy bueno y 10 Satisfactorio,

Tabla 57

Análisis de resultados de cada pregunta planteada

Pregunta	Bueno		Muy Bueno		Satisfactorio	
	Estudiante	Porcentaje	Estudiante	Porcentaje	Estudiante	Porcentaje
P1	2	12.50%	6	37.5 %	8	50.0 %
P2	0	0.00%	10	62.5 %	6	37.5 %
P3	0	0.00%	9	56.25 %	7	43.75 %
P4	0	0.00%	9	56.25 %	7	43.75 %
P5	0	0.00%	8	50.0 %	8	50.0 %
Promedio General		2.5 %		52.5 %		45%

Nota. La valoración de (1) Deficiente y (2-4) Regular ha sido suprimida de la tabla final ya que no presentaba ningún resultado de algún estudiante.

Como se observa en los resultados presentados, 90% de las respuestas se concentran en la categoría de muy bueno y satisfactorio, teniendo un gran porcentaje en cada una de las preguntas en la categoría de satisfactorio que representa la puntuación máxima de la evaluación, con lo cual se puede establecer que los estudiantes poseen una perspectiva positiva sobre el aporte realizado en la guía de laboratorio. Sin embargo, se presenta un

porcentaje de 12.50 % en la categoría de bueno, en la pregunta P1, cuentan con un 1 voto en esta categoría, la cual hace referencia a los pasos detallados en la guía para la calibración de los equipos, la cual presente un área de mejora en el detalle de las instrucciones, pasos y fotografías que se presenta en la documentación para mejorar el entendimiento de los estudiantes al momento de realizar esta práctica de laboratorio.

Guía Laboratorio 3

La guía de laboratorio 3, para la materia de control de procesos Industriales, ha sido implementada con el tema de “Modelamiento de la planta y sintonización del controlador PID”, la cual se presenta en el apéndice 8.

En esta documentación se presenta el planteamiento de la guía de laboratorio con el objetivo de familiarizar a los estudiantes con el método de modelamiento de la planta por el método de Ziegler y Nichols tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, y la sintonización del controlador PID para poder aplicar criterios de modelado y sintonización en un lazo de control utilizando la herramienta que proporciona Simulink y Matlab.

Por otro lado, en el apéndice 9 se presenta un instructivo para el modelado y sintonización, donde se proporciona pasos detallados de cómo se realiza este procedimiento, este documento no se proporciona con actividades por desarrollar de parte de los estudiantes, sino, se establece como una guía detallada para el uso y manejo de softwares como Matlab y Simulink, para el modelado automático de las plantas, mejorando así el modelado tradicional que se tiene de las plantas mediante ensayos manuales o basados en datos empíricos, con ello se pretende mejorar la precisión de estimación de la función de transferencia correspondiente al sistema y ampliar los conocimientos de los software de utilización en los estudiantes.

Plan te Mantenimiento

Para mantener a la estación de procesos CTN-1 funcional y sin fallos se presenta un plan de mantenimiento en donde se detallan las tareas requeridas en su ejecución, teniendo en cuenta los materiales y requerimientos necesarios para llevarse a cabo por cada equipo. Partiendo del estado actual de la planta, realizando un reconocimiento general de los equipos que conforma el sistema para generar así la documentación donde se aplica la hoja de rutina de los equipos para su mantenimiento.

Para la implementación del plan de mantenimiento se realizó las siguientes actividades:

- Reconocer los equipos de la estación de procesos
- Definir las tareas del mantenimiento
- Realizar el instructivo de plan de mantenimiento

Reconocer los equipos de la estación de procesos

En la determinación de estado actual de la planta y de los equipos que esta la conforman se determina los equipos de la estación de procesos de los cuales se definen tareas de mantenimiento.

Definir las tareas del mantenimiento

En la definición de las actividades de mantenimiento preventivo se realiza lo siguiente:

- Desarrollar la plantilla del plan te mantenimiento para mantener de forma estandarizada la planificación.
- Establecer las tareas de mantenimiento por cada equipo.

Instructivo para el plan de mantenimiento

Actividad donde se desarrolla el manual del plan de mantenimiento preventivo y correctivo, en este documento se acaban los resultados obtenidos en el reconocimiento de los equipos de la estación de procesos y la definición de las tareas del mantenimiento planificado para cada una de los equipos.

En el apéndice 10 se presenta el plan de mantenimiento preventivo para los equipos que constan de la estación de procesos CTN-1, con el fin de establecer un funcionamiento óptimo y eficiente de la estación de entrenamiento industrial, con el cual también se pretende minimizar los tiempos de inactividad de la estación y los equipos para el uso de los estudiantes de las materias de instrumentación industrial, control de procesos y futuros tesis.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Para el desarrollo del proyecto de la Unidad de Integración Curricular se llevó a cabo mediante la implementación de la metodología de proyectos, la cual abarca la realización de la Ingeniería conceptual, básica y de detalle. La ingeniería conceptual, definió el uso de la estación de procesos CTN-1 y los lazos de control del proceso 1 y 2, por otro lado, en la ingeniería básica y de detalle se realizó la implementación del hardware, el diseño e implementación de la fase de control de potencia de la niquelina, el modelamiento y sintonización de las plantas y la puesta en marcha.

La generación de pulsos PWM se implementó mediante dos temporizadores, cuyos flancos generan el de cambio de estado del PWM con una resolución del ciclo de trabajo de 0.1%. Se realizaron pruebas con los valores críticos del ciclo de trabajo del 1%, 2%, 99% y 99.9% donde se evidenció que aún en los valores críticos, la frecuencia de conmutación máxima 1[kHz] de los equipos no es superada.

En el proceso de identificación de las plantas, se realizaron seis iteraciones variando los polos y ceros, los porcentajes de estimación alcanzados indican un alto nivel de precisión en la identificación de los modelos dinámicos de las plantas donde se selecciona la función de transferencia para nivel, temperatura y cauda, las cuales cuentan con las siguientes características: nivel, con dos 2 polos, cero ceros y una estimación de 87,57%, caudal con dos 1 polos, cero ceros y una estimación de 91.88%, y temperatura con 1 polo, cero ceros y una estimación de 97.94 %,

En las técnicas de control (P, PI y PID) se alcanzó los criterios de diseño establecido para cada planta. En la planta de nivel se definió un tiempo de establecimiento de 120s, en los controladores el máximo tiempo de establecimiento fue en el controlador PID con 38s, también se definió el error en estado estable del 2%, en los controladores implementados se obtuvo un error máximo en el controlador P con un 1.6%, en cuanto al overshoot establecido fue de 3.5%, obteniendo en la implementación de los controladores un overshoot máximo en el controlador P de 1.6%. Por otro lado, en la planta de temperatura se definió un tiempo de establecimiento de 240s, en los controladores el máximo tiempo de establecimiento es en el controlador P con 150s, también se definió el error en estado estable del 2%, en los controladores implementados se obtuvo un error máximo en el controlador PID con un 1.11%, en cuanto al overshoot establecido fue de 10%, obteniendo en la implementación de los controladores un overshoot máximo en el controlador P de 1.33%

En el diseño de implementación de lazos de control con la variable de caudal, se identificó como el control de caudal para eliminar el error realiza variaciones bruscas en el variador, perjudicando así la vida útil de los equipos. En vista de este inconveniente se deja planteado una estrategia de control selectivo para precautelar la durabilidad del dispositivo.

Se diseñó una HMI de 4 pantallas: acceso de usuario, principal e históricos de los procesos 1 y 2, la cual ha sido diseñada bajo la norma ISA-101, en donde especifica el uso de color, navegación, siguiendo la filosofía de baja carga mental. El HMI fue implementada logrando el objetivo de supervisión, control y adquisición de datos. Dentro del control se contempló la modificación del set point y los parámetros de los controladores (K_p , T_i , T_d).

Se realizó pruebas de elementos de medición de caudal, temperatura y nivel a partir de 10 y 15 muestras por variable, en el cual se estableció el error absoluto de 1.31 [%] en la

medición de nivel, en la medición de caudal se obtuvo un error dinámico de 0.258 [l/min] mientras que en la medición de temperatura un error dinámico de 0.06 [°C]

El diagrama P&ID se planteó con el fin de detallar la distribución de tuberías y equipos del proceso 1 y proceso 2, así como, en el planteamiento de la estrategia de control de tipo cascada y tipo override. Por otro lado, el graficet se utilizó como herramienta para establecer la lógica de programación del funcionamiento general, así como el de control de potencia.

Se implementó tres guías de laboratorio, dos de las cuales fueron implementadas con estudiantes de Instrumentación Industrial. Con el fin de evaluar su utilidad se realizó encuestas de satisfacción, en donde el promedio general de 63.75% evaluando como Satisfactorio (Puntuación 8-10) en la guía de laboratorio de Diagrama P&ID y un 52.5% como Muy bueno (puntuación 8-9) en la guía de laboratorio Instrumentos Industriales. Un área de mejora que fue identificada con una calificación promedio de 3.75% fue el detallar las instrucciones en las guías de laboratorio.

Se analizó el funcionamiento de la estación de procesos CTN-1 y los equipos que la conforman, mediante el cual se estableció que con la instalación de válvulas proporcionales se puede implementar estrategias de control en el lazo de nivel control en cascada y en el lazo de caudal control selectivo. En el presente trabajo se dejó establecido el diagrama P&ID de estas dos estrategias, en donde se puede visualizar los equipos requeridos para su implementación.

Recomendaciones

Se recomienda considerar las especificaciones del proceso en donde se está trabajando para poder dimensionar de manera efectiva los equipos a instalar, en el caso de que se posee un elemento sobredimensionado, se sugiere realizar la calibración del equipo, así como identificar la resolución del equipo para poder ser si pese al rango que trabaja cuenta con la resolución suficiente para el objetivo se lleve a cabo.

En el modelamiento de la planta, se debe tener en cuenta el orden resultante de la planta que se está obteniendo. Un principio clave para identificar que el orden seleccionado es mayor del que representa en realidad la planta, es que un orden mayor no aporta un beneficio significativo en términos de precisión del sistema, con lo cual se debe preferir un enfoque más simple de menor grado posible.

Trabajos Futuros

El sistema de control de procesos se puede utilizar en el análisis e implementación de estrategias de control analizados en la materia de Control de Procesos, tales como: cascada, selectivo, override. El planteamiento de las estrategias de control, vienen dados por la finalidad que se pueda analizar la opción de implementar elementos finales de control proporción para poder implementar dichas estrategias.

Capítulo V. Bibliografía

- Adam, E. J. (2020). *Instrumentación y Control de Procesos*. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- ANSI-ISA 101. (2015). *American National Standard Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. Estados Unidos de Norteamérica.
- Arian Control & Instrumentación. (2003). *Como sintonizar un control PID, teoría y práctica*. Chile.
- Bustos, S. (2017). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL INDUSTRIAL BASADO EN EL ESTÁNDAR IEC-61499*. Ambato: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.
- Carvajal Pérez, C. J., & Contreras Campos, M. J. (2016). *Elementos Finales de Control*. Meturín: Universidad de Oriente.
- Casa Ilaquiche, M. A., & Ortiz Ortiz, J. E. (2017). *Implementación de un módulo didáctico con control PID y lógica difusa para manejar las variables nivel y caudal*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cesca, M. R., Ingaramo, A. P., & Jeger, P. M. (2016). *Control de procesos Industriales - Elementos de Medición*. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.
- Cesca, M. R., Ingaramo, A. P., & Vera van Gelderen, E. M. (2020). *Elementos finales de control*. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.
- Correa Eras, A. Y., & Remache Ortega, E. P. (2006). *Sistema para controlar la velocidad de un motor DC utilizando modulación de ancho de pulso*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Grupo Alfaomega.

Elodia, G. (2015). *Slide player*. Obtenido de Slide player: <https://slideplayer.es/slide/1725064/>

FOTEK. (2020). *FOTEK*. Obtenido de FOTEK:

[https://www.photosensor.com.tw/Solid%20State%20Relay/Single%20Phase%20Solid%20State%20Relay%20\(DC%20to%20DC%20SSR\)/SSR-10DD.htm](https://www.photosensor.com.tw/Solid%20State%20Relay/Single%20Phase%20Solid%20State%20Relay%20(DC%20to%20DC%20SSR)/SSR-10DD.htm)

Gato, F. Z., Pardo, H. Q., Perez, E. J., Casteleiro, J. L., & Calvo, J. L. (2020). *Diseño de Controladores PID*. España: Universidad Da Coruña.

González Muñoz, F. S., & Balbin Vallejo, A. F. (2015). *Diseño de un controlador digital universal PID con características de tipo industrial*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

Gordillo, C. (2019). *Repotenciación del proceso de llenado y tapado para el área de medicamentos líquidos del laboratorio farmacéutico Lamosan-fase 1: diseño y simulación*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Hycontro. (2010). *Manual de instrucciones de Microflex LR – Transmisor inteligente*. Reino Unido.

Invertek Drivers. (2016). *Instrucciones de Instalación y Operación Opdrive*. Invertek Drivers.

Matango, D. G., & Portilla, F. D. (2016). *Diseño e Implementación de un módulo didáctico para el monitoreo y control automático de presión y temperatura de agua*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.

MathWorks. (2024). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks:

<https://la.mathworks.com/help/slcontrol/ug/how-pid-autotuning-works.html>

Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. Argentina: Universidad Nacional de Quilmes.

Moya, V. (2022). *Creación de un sistema de entrenamiento industrial para el aprendizaje profesionalizante de los estudiantes de la Carrera de Electrónica y Automatización*.

Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Muñoz, F. (2020). *REPOTENCIACION Y MODERNIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MANUFACTURA FMS 2101 DEL DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS "ESPE"*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Pardo Martín, C. F. (febrero de 2024). *Tecno Recursos*. Obtenido de Tecno Recursos:

<https://www.picuino.com/es/control-pid.html>

Paredes, A. D. (2013). *Ax Desarrollador*. Obtenido de Ax Desarrollador:

<https://axdesarrollos.blogspot.com/2013/09/explicacion-control-de-fase-directo.html>

PESÁNTEZ, A. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE LABORATORIO CON VARIADOR DE FRECUENCIA PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE BOMBEO Y DETERMINACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO*. RIOBAMBA: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Prada, C. d. (s.f.). *Estructuras de Control*. España: Universidad de Valladolid.

Puig, O., Pérez, S., Garcia, N., Fernández, X., Candela, P., & Bartrolí, A. (2020). *Planta de Producción de óxido de Etileno*. España: Universidad Autónoma de Barcelona.

Recalde, C., & Sinailin, B. (2023). *REPOTENCIACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CAUDAL MEDIANTE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE Y UN PANEL TÁCTIL PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Rockwell Automation. (Abril de 2017). *User Manual MicroLogix 1100 Programmable Controllers Bulletin 1763 Controllers and 1762 Expansion I/O*.

Salazar, S. (2017). *REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.