

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL CON PLC PHOENIX CONTACT
MOD PLCNEXT CONTROL

Trabajo de titulación para optar al título
profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Ulises Arnaldo Orellana Ulloa

Profesor Guía:

Mag. Loreto Elisa Marín Carcey

RESUMEN

KEYWORDS: PHOENIX CONTACT, PLC ENGINEER, PLCNEXT CONTROL, PID, CONTROL.

En este trabajo, se explorará la importancia y la valorización de los bancos de pruebas multivariantes, y se evaluará la idoneidad del PLC Phoenix Contact para la implementación de un controlador PID. Se discutirán sus ventajas y desafíos, así como su potencial para mejorar la precisión y la eficiencia de los procesos industriales. Además, se presentará un ejemplo concreto de su aplicación en un banco de pruebas, aportando así a la diversificación del laboratorio de control industrial, ubicado en El Departamento de Electrotecnia e Informática (ELINF), destacando las implicaciones y los resultados de esta implementación.

El trabajo comienza con un análisis detallado de los recursos del proyecto para su posterioridad analizar el comportamiento dinámico del sistema del estanque, identificando las variables clave que afectan al nivel de agua. Posteriormente, se propone y desarrolla un controlador PID adaptado a las características específicas del sistema, considerando factores como la capacidad del estanque, la velocidad de entrada y salida de agua, y posibles perturbaciones externas.

La implementación del controlador PID se realiza mediante técnicas de simulación y pruebas en un entorno controlado de la Universidad. Se evalúa la respuesta del sistema ante diferentes escenarios y condiciones operativas, ajustando los parámetros del PID para optimizar el rendimiento del control, emulando una planta industrializada, donde la aplicación de un variador de frecuencia no es opción.

Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del controlador PID en la regulación del nivel de agua, logrando una respuesta rápida y precisa frente a variaciones en las condiciones del sistema. Además, se discuten posibles mejoras y aplicaciones prácticas del controlador en contextos reales, los cuales fueron presentados durante su desarrollo.

En conclusión, este trabajo contribuye al campo de la automatización y control, al desarrollar un controlador PID específico para la gestión del nivel de agua en estanques. Los hallazgos y metodologías presentadas ofrecen perspectivas útiles para implementaciones prácticas en sistemas similares, destacando la importancia de un control eficiente en aplicaciones que requieren una gestión precisa de los recursos hídricos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES	2
1 ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES	3
1.1 LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3.1 Requerimientos	5
1.3.2 Alternativa N°1: PLC ABB modelo PM554-T	6
1.3.3 Alternativa N°2: PLC Delta modelo DVP20SX211R	7
1.3.4 Alternativa N°3: PLC Phoenix Contact modelo PLCNext Control	8
1.3.5 Evaluación de las alternativas	10
1.3.6 Alternativa seleccionada	11
1.4 RECURSOS DEL PROYECTO	12
1.4.1 Laboratorio de control de procesos (M-2.03)	13
1.4.2 Banco de pruebas multivariables	13
1.4.3 Controlador lógico programable (PLC)	16
1.5 OBJETIVOS	16
1.5.1 Objetivo General	17
1.5.2 Objetivos Específicos	17
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	18
2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	19
2.1 CONCEPCIONES PREVIAS	19
2.1.1 Lenguaje de programación	20
2.1.2 Plataforma NODE-RED	20
2.1.3 Comunicación MQTT	21
2.1.4 Plataforma UBIDOTS	21
2.1.5 Controlador proporcional, integral y derivativo	22
2.1.6 Diagrama del lazo abierto de control	24
2.1.7 Diagrama del lazo cerrado de control	24
2.2 PREPARACIÓN DE INSTRUMENTAL ELECTRÓNICO	25
2.2.1 Módulos de entradas/salidas de características análogas/digital	26
2.2.2 Desarrollo digital	28

2.2.3	Modelamiento del sistema a lazo abierto	31
2.2.4	Programación del sistema a lazo cerrado	35
2.2.5	Sintonización de parámetros con PID TUNER	37
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y MEJORAS A CONSIDERAR		40
3	RESULTADOS Y MEJORAS A CONSIDERAR	41
3.1	PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA	41
3.2	RESPUESTA DEL SISTEMA	45
3.2.1	Respuesta del controlador de nivel PID	46
3.2.2	Análisis de la respuesta del sistema	48
3.2.3	Controlador con compensación de conmutación	50
3.3	CONSIDERACIONES PARA MEJORAR	52
3.3.1	Instalación de Node-Red en raíz de PLC	52
3.3.2	Visualización de los datos en monitor remoto	53
3.3.3	Mejoras en válvula proporcional	55
CONCLUSIONES		57
BIBLIOGRAFÍA		58
ANEXOS	60	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES CAUSAS DEL PROBLEMA	4
FIGURA 1-2 - PLC ABB MODELO PM554-T	7
FIGURA 1-3 - PLC DELTA MODELO DVP20SX211R	8
FIGURA 1-4 - PLC PHOENIX CONTACT MODELO PLCNEXT CONTROL AXC F 2152	9
FIGURA 1-5 - PÁGINA WEB CON INFORMACIÓN DEL SOFTWARE PLCNEXT ENGINEER Y ACCESO A DESCARGA	12
FIGURA 1-6 - DISTRIBUCIÓN DE BANCOS DE PRUEBAS DEL LABORATORIO DE CONTROL N°2.03	13
FIGURA 1-7 - BANCO DE PRUEBAS MULTIVARIABLES	14
FIGURA 1-8 - DIAGRAMA P&ID DEL PROYECTO A REPLICAR CON EL CONTROLADOR ELEGIDO.	15
FIGURA 2-1 - DIAGRAMA REFERENCIAL DE OPERATIVIDAD DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MQTT	21
FIGURA 2-2 - GRÁFICOS REFERENCIALES UTILIZANDO LA PLATAFORMA DE UBIDOTS	22
FIGURA 2-3 - RESPUESTA DE CONTROLADOR PID FRENTE UN ESCALÓN UNITARIO	23
FIGURA 2-4 - PLANTA DE PROCESOS A LAZO ABIERTO	24
FIGURA 2-5 - PLANTA DE PROCESOS A LAZO CERRADO	25
FIGURA 2-6 - PLCNEXT CONTROL DE PHOENIX CONTROL DISPONIBLE EN LA UNIVERSIDAD	26
FIGURA 2-7 - MÓDULOS I/O ANÁLOGOS Y DIGITALES PARA PLC PHOENIX CONTACT	27
FIGURA 2-8 - SOFTWARE DE DESARROLLO PARA EL PLCNEXT CONTROL	28
FIGURA 2-9 - EDICIÓN DE CONFIGURACIÓN DE IP, DETERMINADA BAJO MISMA RED QUE PLC	29
FIGURA 2-10 - PANTALLA DE INICIO PLCNEXT ENGINEER 2023	30
FIGURA 2-11 - PARÁMETROS DE AJUSTES Y CONFIGURACIÓN PARA LA VINCULACIÓN ENTRE PLC Y COMPUTADORA PORTÁTIL	30
FIGURA 2-12 - PARÁMETROS DE AJUSTES Y CONFIGURACIÓN PARA LA VINCULACIÓN ENTRE PLC Y COMPUTADORA PORTÁTIL	31
FIGURA 2-13 - PRUEBAS OPERACIONALES A LAZO ABIERTO	32
FIGURA 2-14 - UTILIZACIÓN DEL APLICATIVO SYSTEM IDENTIFICATION PARA EL MODELAMIENTO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA	34
FIGURA 2-15 - CAPTURA DE LA TURBIEDAD DETECTADO POR EL SENSOR DE PRESIÓN	36
FIGURA 2-16 – PROGRAMACIÓN DEL CONTROL PID CONTROLADOR DE NIVEL	36
FIGURA 2-17 - CONTROLADOR DE LA PLANTA A LAZO CERRADO, ELABORADO EN SIMULINK	37
FIGURA 2-18 -CONFIGURACIÓN DEL FOCO DEL SINTONIZADOR AUTOMATICO PID	38
FIGURA 2-19 - SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL CONTROLADOR PID	39

FIGURA 3-1 - BLOQUE DE PROGRAMACIÓN PID, CON LA SEÑALIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS KP, KI Y KD 41

FIGURA 3-2 - A LA IZQUIERDA CONTROLADOR PID DE LA FORMA PARALELA Y A LA DERECHA UN CONTROLADOR DEL TIPO NO INTERACTIVO O CONVENCIONAL 42

FIGURA 3-3 - ENLACE CREADO EN NODE-RED PARA LA EXPORTACIÓN DE DATOS A UBIDOTS 44

FIGURA 3-4 - DASHBOARD CREADO EN UBIDOTS 45

FIGURA 3-5 - PRUEBAS DE CONTROL DE NIVEL CON CONTROLADOR PID 46

FIGURA 3-6 - TIEMPO DE ASENTAMIENTO DEL CONTROLADOR PID 47

FIGURA 3-7 - APLICACIÓN DE UNA PERTURBACIÓN EN ESTANQUE DE ACUMULACIÓN 48

FIGURA 3-8 - DISEÑO CON CONTROL SYSTEM DESINGN 50

FIGURA 3-9 – CÁLCULO CONTROLADOR PID CON MATLAB 51

FIGURA 3-10 - RESPUESTA DE LA PLANTA CON CONTROLADOR PI 52

FIGURA 3-11 - IMAGEN REFERENCIAL DE TARJETA DE MEMORIA NECESARIA PARA PLCNEXT 53

FIGURA 3-12 - HABILITACIÓN DE MATLAB EN PLCNEXT ENGINEER 54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Tabla de puntuación de valoración 10

Tabla 1-2. Tabla de valoración de alternativas expuestas 11

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

A. SIGLAS:

A/D	:	análogo / Digital
API	:	Application Programming Interface
DI	:	Digital Input
DO	:	Digital Output
ELINF	:	Departamento de electrotecnia e informática
FBD	:	Function Block Diagram
FW	:	Firmware
IEC	:	International Electrotechnical Commission
IOT	:	Internet Of Things
ISA		International Society of Automation
LD	:	Ladder Logic
MQTT	:	Message Queuing Telemetry Transport
PID	:	Proporcional Integral Derivativo
PLC	:	Programador lógico de control
SCADA	:	Supervisory Control and Data Acquisition
SP	:	Set Point
ST	:	Structured Text
UTFSM	:	Universidad Técnica Federico Santa María

B. SIMBOLOGÍAS

cm	:	Centímetro
mA	:	Miliamperio
MB	:	Megabyte
N°	:	Número

INTRODUCCIÓN

El controlador PID es uno de los algoritmos de control más utilizados en la ingeniería de control, y su aplicabilidad es diversa. Permite mantener una variable de proceso en un valor deseado a través del ajuste continuo de las acciones proporcional, integral y derivativa. En un entorno industrial, donde la variabilidad y la interdependencia de múltiples variables son comunes, la implementación de un controlador PID eficiente es esencial para mantener la estabilidad y la precisión del proceso.

En este contexto, la selección del hardware adecuado para la implementación de un controlador PID es de suma importancia. Los PLC's son dispositivos versátiles que han demostrado ser excelentes herramientas para la automatización y el control industrial. Phoenix Contact es un fabricante respetado en la industria de la automatización, ofreciendo soluciones avanzadas en este campo. La elección del PLC Phoenix Contact, modelo PLCNext Control, para implementar un controlador PID en un banco de pruebas multivariables es una opción que merece una consideración detallada.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES

1 ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES

El presente capítulo tiene como objetivo dar el conocimiento, la orientación y el contexto donde se desarrollará el trabajo de implementación de sistema de control PID de nivel con PLC Phoenix Contact, modelo PLCNext Control, exponiendo además sobre su uso y su planta de prueba ubicada en las mediaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María.

1.1 LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN

El presente proyecto se desarrolla en las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María. Institución inaugurada en 1931, en cumplimiento con las cláusulas testamentarias del señor Federico Santa María Carrera, con el objetivo de apoyar a los desvalidos meritorios a alcanzar el más alto grado del saber humano. Que posteriormente amplió sus fronteras a nuevas sedes, como la sede José Miguel Carrera en la ciudad de Viña Del Mar, que es donde da lugar al epicentro del desarrollo del proyecto prescrito, más específicamente, en la edificación “M” correspondiente al Departamento de Electrotecnia e Informática (ELINF).

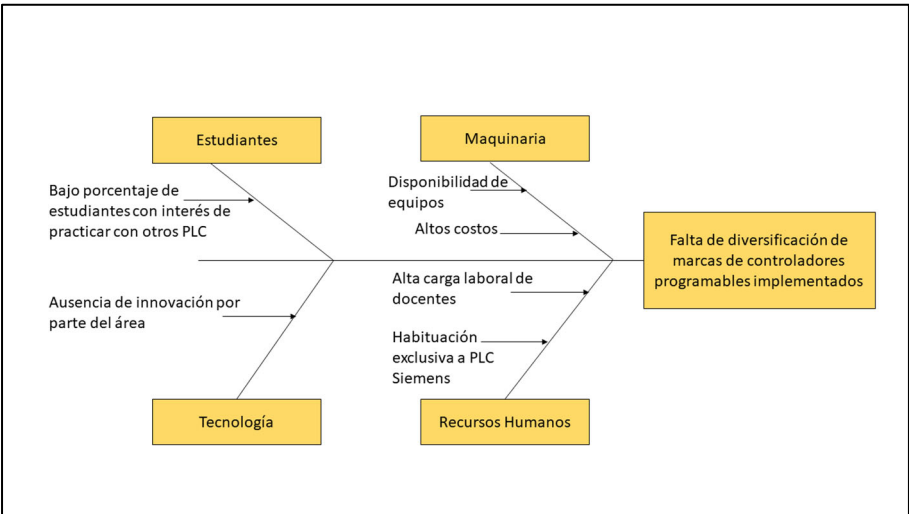
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La implementación y gestión de bancos de pruebas desempeñan un papel crucial en el modelo educativo de aprendizaje activo. Estos recursos resultan fundamentales en el proceso educativo al permitir a los estudiantes establecer conexiones más significativas, mientras adquieren conocimientos prácticos que serán relevantes en sus futuras experiencias laborales. La utilización de estos recursos en diversas prácticas educativas enriquece la comprensión de los estudiantes y les proporciona un entorno práctico para enfrentar desafíos laborales, fomentando así el desarrollo de habilidades multifacéticas.

En el marco de este proyecto de ingeniería, se plantea la problemática existente en el laboratorio de control industrializado, específicamente en la sala M-2.03 del edificio M. Actualmente, dicho laboratorio cuenta con una gama limitada de controladores programables

(PLC), los cuales se utilizan para llevar a cabo todas las experiencias de laboratorio del curso de **control de procesos**. Esta situación genera limitaciones en cuanto a la dinámica y realismo en las prácticas laborales próximas a desarrollar, ya que en la industria se suele utilizar una mayor variedad de marcas y modelos de PLC, como, por ejemplo: Allen Bradley, Phoenix Contact, Fatek, entre otros.

Entre las otras posibles causas que contribuyen a este problema generalizado, se puede observar en la Figura 1-1, donde se presenta un diagrama de Ishikawa que servirá como base para su análisis y para la formulación de un método que permita encontrar una solución.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 1-1 - Diagrama de Ishikawa para la identificación de posibles causas del problema

Aunque este trabajo de título aborda una parte de un proyecto más amplio, su enfoque se centra en el desarrollo de un controlador de nivel. El objetivo es evaluar la capacidad de dicho controlador para regular el nivel en el estanque de manera confiable. Este aporte busca implementar uno de los controladores más comunes en el modelo de estandarización utilizado en el laboratorio de control industrial.

1.3 **SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

La diversificación del entorno académico no solo representa un impulsor fundamental para la creatividad y la innovación, sino que también desempeña un papel esencial en la mejora

de la satisfacción y el rendimiento general de los estudiantes. El presente trabajo, se embarca en un análisis exhaustivo y una evaluación detallada de algunos de los controladores lógicos programables (PLC) más reconocidos y disponibles en el mercado. Este estudio se enfocará en su implementación y montaje en los bancos de pruebas de multivariables ubicados en la sala M-2.03.

Esta iniciativa se presenta como una solución estratégica a la problemática previamente identificada, la cual resalta la falta de diversificación en el entorno educativo. La limitación en variedad de recursos y enfoques ha generado una atmósfera que carece de dinamismo, lo que a su vez ha afectado la adquisición de conocimientos prácticos y la conexión con la realidad de la industria actual por parte de los estudiantes.

El propósito principal de esta investigación y evaluación de los PLC's es enriquecer el entorno educativo mediante la introducción de nuevas herramientas tecnológicas que permitan una experiencia más completa y cercana a los desafíos reales de la industria. La implementación de estos controladores en los bancos de pruebas de multivariables busca potenciar el aprendizaje, brindando a los estudiantes la oportunidad de adquirir habilidades prácticas más acordes con las demandas del mercado laboral actual.

Esta estrategia no solo busca diversificar el entorno académico, sino también mejorar la experiencia de aprendizaje de los estudiantes al ofrecerles un enfoque más práctico y orientado a la realidad industrial, promoviendo así un aprendizaje más dinámico, práctico y en consonancia con las necesidades del mundo laboral.

1.3.1 Requerimientos

Una posible solución debe abordar dos requerimientos principales: ser factible y contribuir a la función de diversificación del laboratorio de control. Estos requisitos deben ir acompañados de características técnicas definidas que se exponen a continuación. El sistema debe tener la capacidad de gestionar un controlador de nivel de agua mediante un enfoque moderno como el control proporcional, integral y derivativo (PID), lo que implica la capacidad de regular el nivel de forma precisa y eficiente.

Además, es fundamental que el sistema tenga la capacidad de monitorear la planta de forma remota. Esto implica la posibilidad de acceder de manera remota a las opciones y la visualización de los parámetros. En otras palabras, el sistema deberá ser capaz de alcanzar los niveles requeridos de nivel en un tiempo adecuado y sin interrupciones, independiente de las condiciones ideales o no para el caso. También, en el caso que se presenten perturbaciones o contratiempos, el sistema debe ser capaz de subsanarlos con prontitud.

Esta solución, que combina la capacidad de control preciso con la opción de monitoreo remoto, no solo busca cumplir con los requerimientos técnicos, sino que también se alinea con el propósito de mejorar la funcionalidad y eficacia del laboratorio de control. Asimismo, sienta las bases para una implementación que respalde la diversificación de las prácticas educativas y promueva un entorno de aprendizaje más dinámico y realista para los estudiantes.

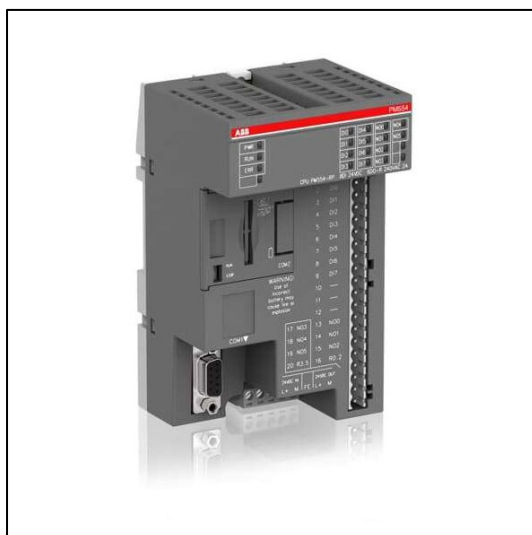
1.3.2 Alternativa N°1: PLC ABB modelo PM554-T

El controlador lógico programable (PLC) ABB modelo PM554-T (Figura 1-2) representa un producto fabricado por ABB, una empresa de renombre en el campo de la automatización industrial. Este modelo en particular ha sido diseñado con el propósito de aplicaciones especializadas en el control y la automatización de procesos industriales.

Dentro de sus funcionalidades, el PM554-T, al igual que los PLC's Siemens, proporciona capacidades avanzadas de programación que permiten la implementación de algoritmos de control PID. A través de entornos de programación como CoDeSys u otros softwares compatibles, ingenieros y programadores pueden desarrollar y escribir el código necesario para configurar un controlador PID de manera eficiente y precisa.

Es importante destacar que el PLC ABB modelo PM554-T, por sí mismo, no dispone de capacidades intrínsecas para el monitoreo en línea de parámetros, ya que su función principal se centra en el control y la automatización de procesos industriales. No obstante, es fundamental resaltar que la versatilidad de muchos sistemas de control industrial, incluyendo los PLC, radica en su capacidad para conectarse a sistemas de supervisión y adquisición de datos, comúnmente conocidos como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) o sistemas de monitoreo remoto.

Estos sistemas especializados posibilitan la visualización y monitoreo de los parámetros y variables que son controlados por el PLC. En este sentido, el PM554-T, al formar parte de un sistema más amplio de control y automatización, puede ser conectado a un software de supervisión o a un sistema SCADA. Esto facilita el monitoreo en tiempo real de los parámetros y variables gestionadas por el PLC, ofreciendo una visión detallada y precisa de las operaciones en curso, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas en entornos industriales.



Fuente: <https://new.abb.com/products/es/1SAP120600R0001/pm554-tp?CL>

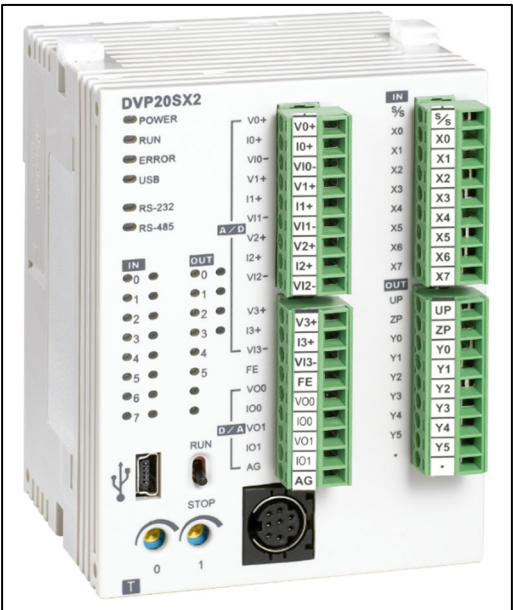
Figura 1-2 - PLC ABB modelo PM554-T

En resumen, el PLC ABB modelo PM554-T es una solución robusta y versátil que ofrece un rendimiento confiable, flexibilidad de programación y amplia conectividad, lo que lo convierte en una opción popular para la automatización industrial en diversos sectores.

1.3.3 Alternativa N°2: PLC Delta modelo DVP20SX211R

Otra alternativa a considerar es el PLC Delta (Figura 1-3), específicamente el modelo DVP20SX211R, perteneciente a la serie DVP-SX2 desarrollada por la reconocida compañía Delta Electronics. Este controlador lógico programable (PLC) ha ganado renombre en el ámbito industrial y la automatización debido a su versatilidad y amplio uso en diversos entornos.

El PLC Delta, reconocido por su fiabilidad, se destaca por su capacidad para implementar un controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) en aplicaciones industriales. Esta funcionalidad es fundamental para el control de procesos en sectores como la manufactura, la ingeniería de sistemas y otros entornos industriales. Sin embargo, es esencial considerar que la capacidad de ejecutar un controlador PID puede variar en función de la versión del software de programación y las capacidades específicas de ese modelo de PLC.



Fuente: <https://www.fabelec.cl/producto-detalle/dvp/plc-dvp20sx211r>

Figura 1-3 - PLC Delta modelo DVP20SX211R

A pesar de sus atributos, es importante tener en cuenta que la implementación del controlador PID puede estar sujeta a limitaciones, como la disponibilidad de ciertas versiones de software o las capacidades inherentes a este modelo de PLC. Por lo tanto, para su implementación efectiva, es crucial evaluar de manera detallada las especificaciones técnicas y las capacidades de la versión del software asociado al modelo en cuestión.

1.3.4 Alternativa N°3: PLC Phoenix Contact modelo PLCNext Control

El PLCNext Control, desarrollado por Phoenix Contact (Figura 1-4), representa un hito en el ámbito de los controladores lógicos programables (PLC), destacándose por su enfoque innovador y su capacidad para ofrecer un amplio espectro de funcionalidades. Este modelo en particular ha captado la atención tanto en el sector industrial como en el académico debido a su versatilidad, precio y capacidad de adaptación.

Una de las características sobresalientes del PLCNext Control es su flexibilidad. Permite la implementación de algoritmos PID tanto en el estándar IEC 61131-3 como en lenguajes de programación de alto nivel, tales como C++ o Python. Esta versatilidad otorga a los desarrolladores la capacidad de escribir y personalizar algoritmos PID de manera acorde a las necesidades específicas del sistema o proceso que están controlando. Pueden ajustar los parámetros del control PID de acuerdo con las particularidades y exigencias del sistema, lo que

permite un control preciso y eficiente en una amplia gama de aplicaciones industriales y académicas.

Además de sus capacidades de control, el PLCNext Control está diseñado con características de conectividad avanzada que facilitan el acceso remoto y el monitoreo de procesos controlados por el PLC. Este acceso remoto se logra a través de su capacidad de comunicación, ya sea mediante tecnologías como Ethernet/IP, Modbus TCP, OPC-UA, MQTT u otros protocolos de comunicación industrial estándar, o incluso a través de interfaces web integradas o soluciones de software personalizadas.

Estas potentes capacidades de conectividad permiten a los usuarios acceder a datos y parámetros del sistema controlado por el PLC desde ubicaciones remotas. Asimismo, posibilitan la supervisión, el control y la modificación de procesos, la recopilación de datos, y la recepción de notificaciones, todo a distancia. Este enfoque resulta sumamente beneficioso para el monitoreo y la gestión de sistemas industriales o educativos, ya que permite realizar estas tareas desde cualquier ubicación con acceso a la red.



Fuente: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/controller-axc-f-2152-2404267>

Figura 1-4 - PLC Phoenix Contact modelo PLCNext Control AXC F 2152

En resumen, el PLCNext Control de Phoenix Contact se distingue por su enfoque flexible y adaptable, que permite a los usuarios implementar soluciones personalizadas y avanzadas en entornos industriales y académicos. Su capacidad para emplear múltiples lenguajes de programación y su enfoque en la conectividad y la seguridad lo convierten en una opción atractiva para aquellos que buscan soluciones de automatización versátiles y de vanguardia.

1.3.5 Evaluación de las alternativas

Para la elección de la solución a implementar se usará un criterio de puntuación, bajo las siguientes características: Costo/accesibilidad, soporte, facilidad para programar, estabilidad/robustez y, por último, la versatilidad; las que, a su vez, serán puntuadas con valoraciones desde el 1 al 5, teniendo el 1 como el valor más deficiente y el 5 como la puntuación máxima del criterio (Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Tabla de puntuación de valoración

Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración de propia autoría

Tras realizar las valoraciones detalladas expuestas en la Tabla 1-2, se destaca que la alternativa 1 registró su menor puntuación en la categoría de precio/accesibilidad. Esta baja valoración se atribuye al equipamiento de alta calidad asociado a un precio elevado. Es importante destacar que la adquisición del PLC de marca ABB, modelo PM554-T, no solo implica el costo del equipo en sí, sino también los gastos adicionales relacionados con cableados y aplicaciones exclusivas de la marca. No obstante, sus puntos fuertes se centran en la estabilidad de sus sistemas, que se caracterizan por su calidad superior, lo que se traduce en una calificación máxima en términos de confiabilidad.

En contraposición, la segunda alternativa presenta un PLC de rango inferior, perteneciente a la marca Delta y modelo DVP20SX211R. A diferencia de la alternativa 1, este equipo se destaca por sus costos más accesibles. Sin embargo, esta opción recibe una valoración más baja debido a su escaso soporte, su limitada confiabilidad y sus limitadas opciones de lenguajes de programación.

La tercera opción recae en el controlador lógico programable de Phoenix Contact, específicamente el modelo PLCNext Control. Esta alternativa proviene de una empresa alemana fundada en 1923, que ha desarrollado una amplia gama de productos para la industria de control. En los últimos años, los PLC de la serie PLCNext Control han ganado relevancia gracias a su accesibilidad y sus características innovadoras que han logrado captar la atención en el ámbito industrial.

Tabla 1-2. Tabla de valoración de alternativas expuestas

CRITERIO ALTERNATIVA	 / Costo Accesibilidad	 Soporte	 de Facilidad programar	 / Estabilidad Robustez	 Versatilidad	 Puntuación final
ABB (PM554-T)	3	4	4	5	5	4,2
Delta (DVP20SX211R)	5	1	2	3	3	2,8
Phoenix Contact (PLCNEXT CONTROL)	5	4	5	4	4	4,4

Fuente: Elaboración de propia autoría

1.3.6 Alternativa seleccionada

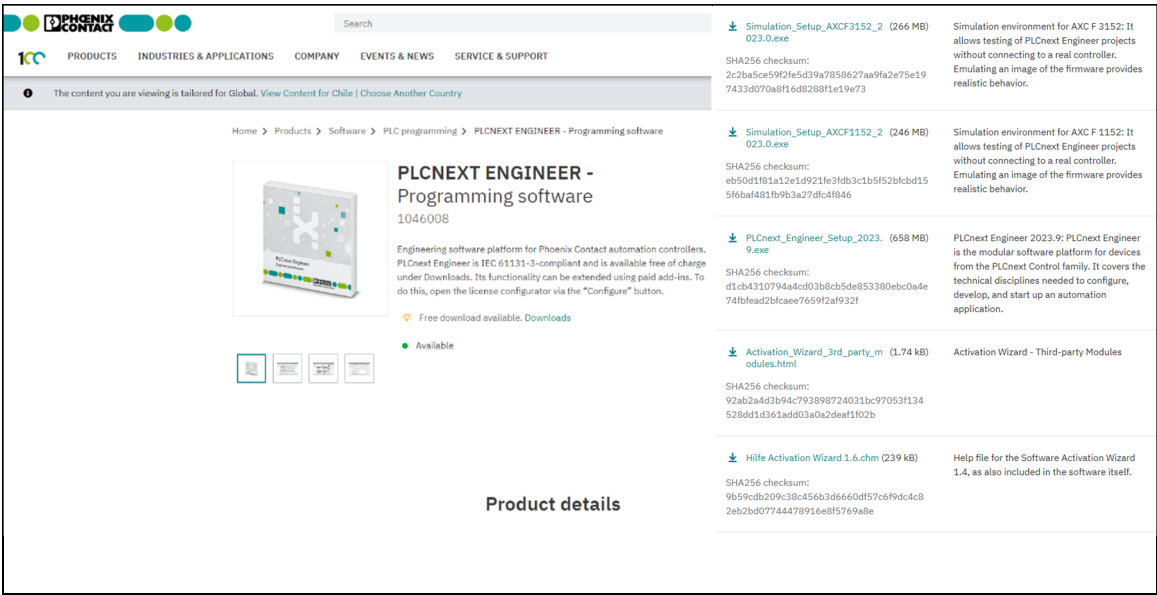
Tras un minucioso análisis y evaluación exhaustiva de las distintas alternativas disponibles, se concluye que el PLC Phoenix Contact, en su modelo PLCNextControl, se elige como la elección óptima y adecuada para el entorno de trabajo especificado en el proyecto. Esta selección, más allá de su viabilidad técnica, se destaca por su excelente ajuste económico, representando un aporte significativo a la diversificación del laboratorio de control M-2.03. La adopción de este PLC no solo proporciona acceso a la innovación, sino que también asegura una escalabilidad imprescindible para el desarrollo y la implementación de soluciones tanto en el ámbito académico como en el industrial.

El PLC Phoenix Contact se consolida como una opción de alta relevancia, debido a su robustez y su excepcional potencial en el diseño de sistemas de control. Sus puntos fuertes radican en la combinación de un enfoque económico junto con una interfaz de usuario intuitiva, lo que simplifica en gran medida su implementación. Además, su software, disponible de manera gratuita en su página oficial (Figura 1-5), se puede descargar sin costo alguno, ocupando un espacio de almacenamiento de aproximadamente 700MB, lo que representa una accesibilidad y facilidad de adquisición notable para cualquier entorno o proyecto de desarrollo.

En otro sentido, es crucial resaltar otro aspecto fundamental: este PLC cuenta con una característica destacada, la cual radica en su capacidad de comunicación a través del protocolo MQTT. Esta funcionalidad otorga la oportunidad de establecer interacciones con múltiples

plataformas de monitoreo en red. La implementación de MQTT en este PLC representa una ventaja significativa, ya que habilita la comunicación eficiente y ágil con diversos sistemas y dispositivos en entornos de monitoreo, permitiendo la transmisión de datos de forma fiable y segura.

La integración del protocolo MQTT amplía considerablemente las posibilidades de interconexión, facilitando el intercambio de información con sistemas de monitoreo y control externos, lo que resulta especialmente relevante en entornos donde la conectividad y la interoperabilidad son esenciales. Esta capacidad no solo potencia la comunicación, sino que también fortalece la integración del PLC en entornos más amplios, lo que puede resultar crucial en aplicaciones donde la supervisión remota y la interacción con múltiples plataformas de monitoreo son requisitos indispensables para garantizar un funcionamiento eficaz y una toma de decisiones informada.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 1-5 - Página web con información del software PLCNext Engineer y acceso a descarga

1.4 RECURSOS DEL PROYECTO

Como ya se ha mencionado anteriormente, el presente proyecto se desarrolla en la institución universitaria, con la disposición de ciertos recursos mencionados a continuación, con los cuales se deben de dar cumplimiento a la finalidad de proponer una segunda alternativa de

control, más atractiva y académica, dentro de los sistemas de control programables, actualmente disponibles en la industria.

1.4.1 Laboratorio de control de procesos (M-2.03)

Tal como se expone en la Figura 1-6, el laboratorio de control de procesos se localiza en el edificio “M” del departamento “ELINF”, donde se encuentra equipado con 8 bancos de pruebas de múltiples variables. Con la posibilidad de ser controlados con diferentes tipos de controladores electrónicos, ya sean PLC o Microcontroladores, a causa de la versatilidad y adaptabilidad de estos.



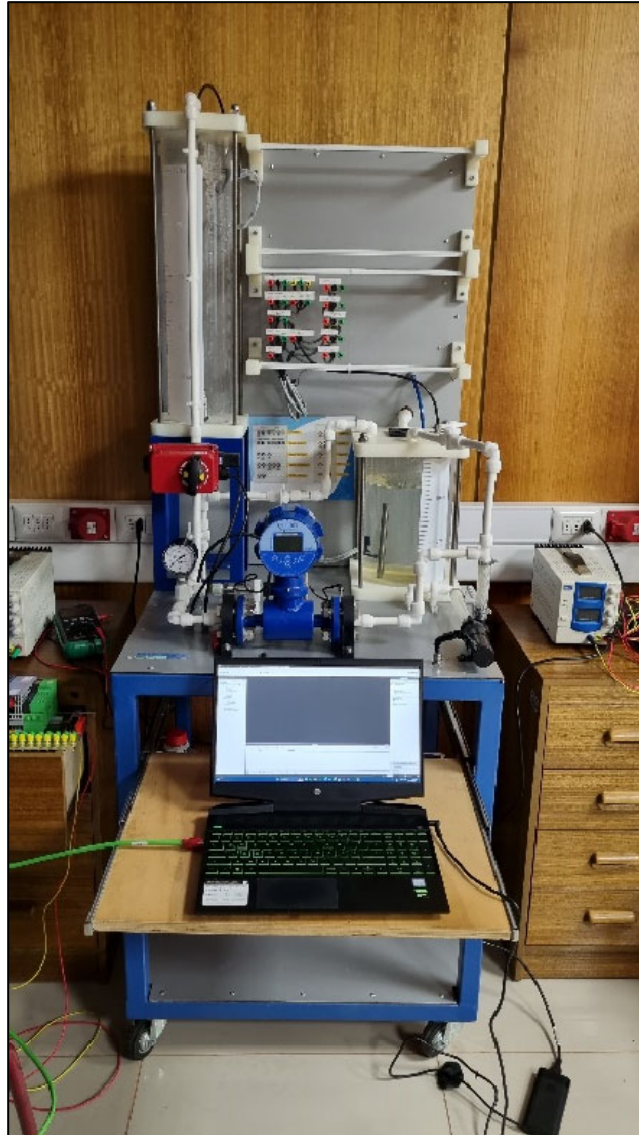
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 1-6 - Distribución de bancos de pruebas del laboratorio de control N°2.03

1.4.2 Banco de pruebas multivariables

El banco de pruebas utilizado, de múltiples variables, ya ha sido objeto de múltiples implementaciones previas, con el manejo de sus distintas variables, en innumerables talleres

prácticos y trabajos de exposición para la postulación de carreras técnicas y de ingeniería a fines con sus usos. Este se puede observar en la Figura 1-7.



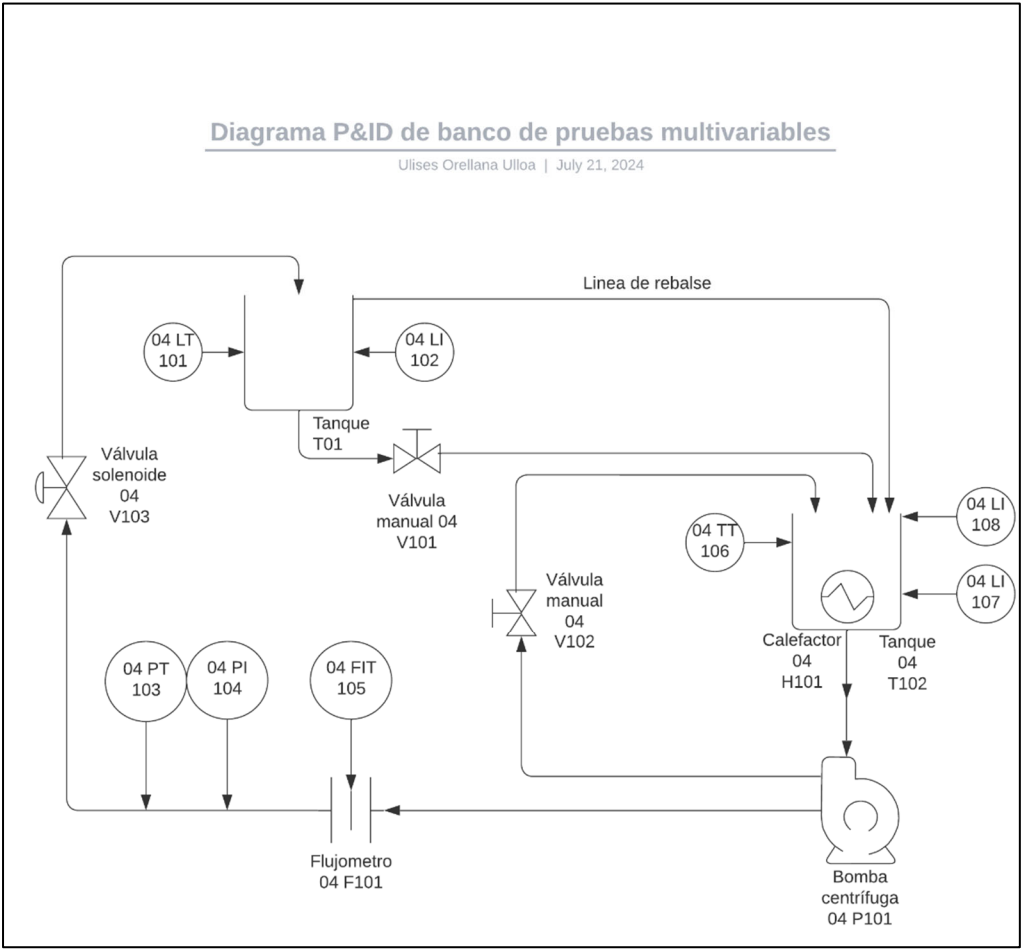
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 1-7 - Banco de pruebas multivariantes

La empresa Riegel ha desarrollado este equipamiento, concebido como un banco de pruebas que incorpora la implementación de variables múltiples. Estas pruebas tienen la capacidad de simular una amplia gama de condiciones comúnmente encontradas en la industria de control e instrumentación. Al examinar la conformidad del banco de pruebas, detallada en la Figura 1-8 y respaldada por los planos P&ID, se destacan los principales equipos a utilizar, entre los que se incluyen:

- Estanque de nivel superior
- Estanque de nivel inferior
- Bomba centrífuga de recirculación
- Válvula proporcional
- Sensores de niveles

En el listado anterior, no se ha incluido el controlador como parte de los equipamientos, ya que la función de la planta es ser transversal a cualquier método de control. Esto significa que puede ser utilizado tanto con un microcontrolador como con un PLC para supervisar y gestionar los actuadores y parámetros mencionados. El controlador se diseñó de manera que su flexibilidad permita adaptarse a diversas soluciones de control, por su gran dinamismo de sus componentes, garantizando así su versatilidad en diferentes aplicaciones, manifestando como ejemplo, su válvula de control proporcional, la cual tiene características muy variadas, como lo son para aplicaciones de control de flujo o modulación, entre otras.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 1-8 - Diagrama P&ID del proyecto a replicar con el controlador elegido.

1.4.3 Controlador lógico programable (PLC)

Un PLC es un dispositivo electrónico utilizado en la automatización industrial para controlar y supervisar procesos y maquinaria. Estos dispositivos son especialmente comunes en entornos de fabricación y producción, donde se utilizan para realizar una variedad de tareas, como el control de máquinas, la monitorización de sensores, la recopilación de datos y la ejecución de lógica programable. Estos dispositivos desempeñan un papel fundamental en la automatización y el control de procesos, lo que ayuda a mejorar la eficiencia, la precisión y la seguridad en entornos industriales.

En la actualidad, el departamento ELINF, tiene a disposición los controladores Siemens modelo S7-1200 y el modelo S7-1500, siendo estos, dos alternativas exclusivas de una misma marca, centralizando las capacidades del alumnado a adquirir los conocimientos diversificados de la realidad de la industria, donde se hayan una variedad de marcas reconocidas realizando trabajos vitales de automatización, como por ejemplo, unas de estas marcas emergente es Phoenix Contact, con su modelo PLCNext control.

1.5 OBJETIVOS

El proceso de estandarización implica el establecimiento de un conjunto de procedimientos y prácticas consistentes que se aplican de manera uniforme a lo largo de todo el proceso. Este enfoque se implementa con la finalidad de optimizar la eficiencia, la calidad, la uniformidad y la repetibilidad de las operaciones.

En el actual desarrollo del proyecto, se busca atender las necesidades planteadas con resultados de alta eficiencia y calidad. El objetivo es presentar al concluir el proyecto una propuesta que no solo satisfaga dichas necesidades, sino que además contemple mejoras para la comunidad universitaria en su totalidad, abriendo así la posibilidad de una mayor integración con el entorno industrial.

A continuación, se detallan los objetivos planteados que se buscan alcanzar al término del trabajo de título. Estos objetivos se clasifican en general y específicos, y se orientan hacia el logro de un desarrollo coherente y satisfactorio que contribuya a resolver las necesidades detectadas y fomente la mejora continua en el ámbito universitario e industrial."

1.5.1 Objetivo General

Diseño e implementación de un sistema de control de nivel PID para la ejecución dentro de un sistema controlado como los bancos de pruebas de la UTFSM, utilizando como recursos, el uso de su válvula proporcional, por sus características inherentes en su hoja de datos, mediante el uso de un PLC de marca Phoenix Contact modelo PLCNext Control.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Implementación y montaje del equipamiento puesto a disposición sobre el banco de pruebas
- Realizar la capacitación correspondiente del hardware a utilizar (Phoenix Contact modelo PLCNext control)
- Realizar la capacitación correspondiente a la herramienta informática encargada de programar el Hardware solicitado (PLCNext Engineer)
- Diseñar sistema de control PID de nivel a utilizar en el banco de pruebas.
- Determinar mediante cálculo los valores más adecuados en la sintonización del controlador PID.
- Transmitir las variaciones de niveles remotamente.
- Realizar pruebas prácticas.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo, se presentará un minucioso análisis de los recursos y metodologías empleados en la concepción y desarrollo de la solución a la problemática mencionada anteriormente. Se detallarán los distintos recursos utilizados, abarcando desde herramientas físicas y tecnológicas hasta metodologías específicas que sustentaron este proceso.

En el desarrollo de la solución, se priorizó la integración de recursos que no solo fueran efectivos en el presente, sino que también sentaran las bases para posibles expansiones futuras o mejoras. Estos recursos y metodologías fueron seleccionados y aplicados de manera estratégica, enfocándose en lograr una solución integral y sostenible que respondiera a la problemática planteada, considerando tanto los aspectos técnicos como los económicos y prácticos.

2.1 CONCEPCIONES PREVIAS

Para abordar esta problemática, se hizo necesario recurrir a una diversidad de recursos, incluyendo herramientas tecnológicas de vanguardia, software especializado y, en algunos casos, adaptaciones de sistemas ya utilizados. Además, se implementaron metodologías de diseño específicas que permitieron estructurar y abordar la problemática de manera eficiente. Estas metodologías comprendieron desde enfoques ágiles hasta métodos de resolución de problemas, y se adaptaron según las necesidades y desafíos encontrados durante el desarrollo del proyecto.

El uso combinado de herramientas físicas y tecnológicas se integró para garantizar la efectividad en la resolución de la problemática. Se realizó un exhaustivo análisis para identificar y seleccionar las herramientas más adecuadas para cada etapa del proceso, lo que incluyó desde equipamiento especializado hasta programas informáticos de última generación. Además, se emplearon metodologías que permitieron no solo abordar los aspectos técnicos, sino también considerar la viabilidad económica, la escalabilidad y la eficiencia operativa de la solución propuesta.

En el siguiente punto, se trata de hacer un barrido rápido a distintos puntos a tener en consideración para entender los puntos siguientes de este proyecto. Se intenta resumir conceptos que servirán como base en los puntos siguientes, como el tipo de dispositivo que vamos a usar, como también aclarar el lenguaje que se utilizará para programar posteriormente, como también,

en esa misma línea, se mencionarán otros recursos existentes en el entorno para hacer uso de ellos, siempre desde un punto de vista general, y sin profundizar en ello.

2.1.1 Lenguaje de programación

Los lenguajes de programación son sistemas formales que se utilizan para escribir programas de computadora y dar instrucciones a una computadora para que realice tareas específicas. Estos lenguajes proporcionan una forma estructurada y legible para comunicarse con las máquinas, permitiendo a los programadores expresar algoritmos y lógica de manera que las computadoras puedan entender y ejecutar.

Los lenguajes de programación desempeñan un papel fundamental en la informática y la electrónica, ya que permiten a los desarrolladores y programadores crear softwares que impulsan una amplia variedad de industrias y campos.

Gracias a la versatilidad del hardware elegido para el desarrollo del control de nivel, este tiene la adaptabilidad para ser programado en varios lenguajes bajo las normas IEC 61131-3, tales como, C++, Java, Python, Ladder o el conocido idioma de bloques de funciones (FBD en sus siglas en inglés). Dicho lenguaje será el utilizado para generar toda la programación, tanto de control como las señales informativas y de alertas en la planta de nivel.

2.1.2 Plataforma NODE-RED

Node-RED es un entorno de programación visual de código abierto diseñado para conectar dispositivos, servicios y API's de forma sencilla, permitiendo la creación de flujos de trabajo (flows) mediante un paradigma de programación visual.

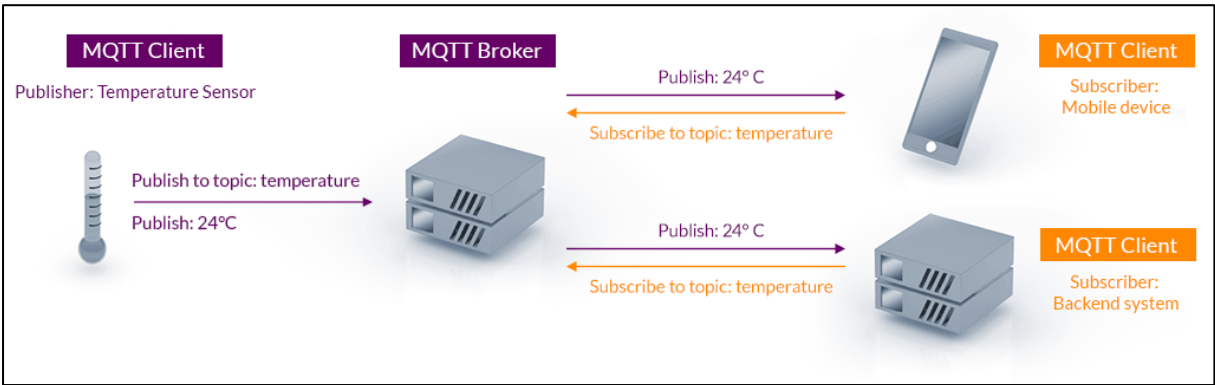
Desarrollado por IBM, Node-RED se basa en Node.js y se utiliza principalmente para conectar hardware, Apis y servicios en el contexto del Internet de las Cosas (IoT), aunque su utilidad se extiende a una amplia gama de aplicaciones.

Node-RED se utiliza en proyectos de automatización, IoT, integración de sistemas y para la creación rápida de prototipos, ya que ofrece una forma visual de conectar y configurar los servicios, facilitando el desarrollo y la depuración de flujos de trabajo. Su enfoque intuitivo y su comunidad activa de desarrolladores lo convierten en una herramienta popular y versátil para la creación de soluciones integradas.

2.1.3 Comunicación MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería ligero y de código abierto diseñado para la transmisión de mensajes entre dispositivos en redes con ancho de banda limitado o con conexiones inestables. Es especialmente útil en entornos donde se requiere comunicación eficiente y confiable, como en el Internet de las Cosas (IoT), donde la disponibilidad de ancho de banda y la energía son recursos limitados.

Este protocolo se basa en el modelo de publicación/suscripción (Figura 2-1), donde los dispositivos se conectan a un "Broker" o servidor MQTT. Los dispositivos pueden publicar mensajes en ciertos "temas" o "Topics" y otros dispositivos pueden suscribirse a estos temas para recibir esos mensajes. Esta arquitectura permite una comunicación asíncrona y distribuida entre múltiples dispositivos, lo que resulta ideal para entornos donde se requiere una comunicación ágil y eficiente.



Fuente: <https://mqtt.org/>

Figura 2-1 - Diagrama referencial de operatividad del protocolo de comunicación MQTT

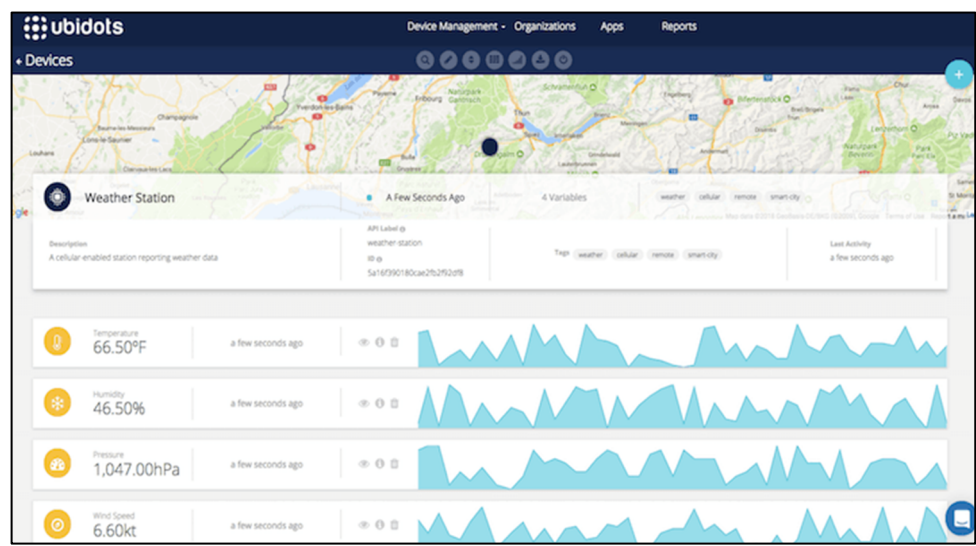
MQTT se utiliza ampliamente en aplicaciones IoT, telemetría, monitoreo remoto, y en situaciones donde se necesite una comunicación liviana, confiable y eficiente entre dispositivos.

2.1.4 Plataforma UBIDOTS

Ubidots es una plataforma en la nube que proporciona servicios para la gestión y visualización de datos en tiempo real, especialmente diseñada para proyectos de Internet de las

Cosas (IoT). Esta plataforma ofrece herramientas para recopilar, analizar y visualizar datos provenientes de dispositivos conectados, sensores y otros sistemas.

Esta plataforma se utiliza ampliamente en aplicaciones de monitoreo remoto, como en la Figura 2-2, gestión de activos, seguimiento de variables de control y una variedad de proyectos IoT que requieren una solución para la adquisición y visualización de datos en tiempo real. Su enfoque amigable para el usuario y su conjunto de herramientas versátiles hacen de Ubidots una opción popular para el desarrollo y la implementación de soluciones IoT.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-2 - Gráficos referenciales utilizando la plataforma de Ubidots

2.1.5 Controlador proporcional, integral y derivativo

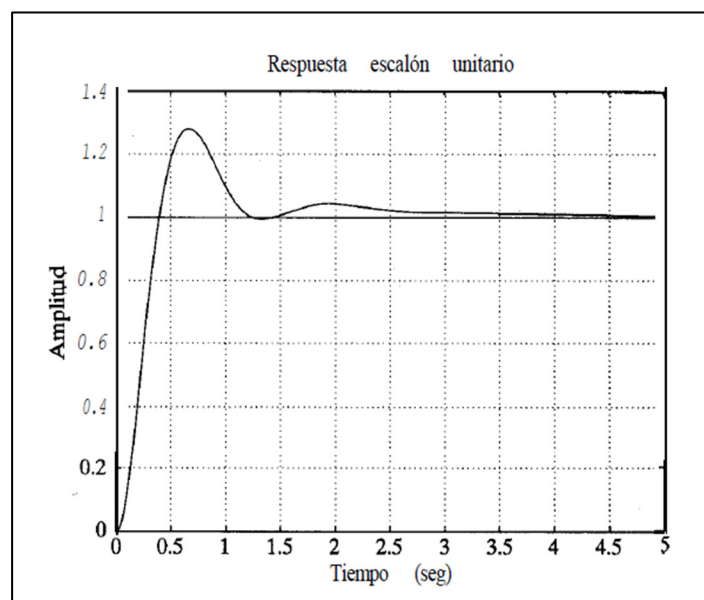
Un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un tipo de controlador utilizado en sistemas de control automático para mantener una variable (generalmente una magnitud física, como la temperatura, la velocidad, la posición, etc.) en un valor deseado o setpoint. El control PID se basa en tres componentes principales que trabajan juntos para ajustar la salida del sistema y minimizar el error entre la variable controlada y el setpoint:

- I. Proporcional (P): El término proporcional está relacionado con la diferencia actual entre la variable de proceso (PV) y el setpoint (SP). Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será la corrección proporcionada por el controlador. El componente proporcional genera una señal de control proporcional al error presente.

- II. Integral (I): El término integral tiene en cuenta la acumulación de errores pasados a lo largo del tiempo. Este componente ayuda a eliminar el error persistente y a mantener la variable controlada igual al setpoint establecido. La acción integral se suma a lo largo del tiempo y corrige el error acumulado.
- III. Derivativo (D): El término derivativo considera la velocidad de cambio del error. Si la diferencia entre SP y PV está cambiando rápidamente (Error), el componente derivativo proporciona una corrección para evitar que la variable controlada se aleje demasiado del setpoint debido a cambios bruscos. Ayuda a reducir la oscilación en el valor medido y mejorar la estabilidad del sistema.

El controlador PID calcula una señal de control sumando estos tres términos, cada uno multiplicado por un coeficiente ajustable (K_p , K_i y K_d) que se sintoniza según las características específicas del sistema. Al ajustar estos coeficientes adecuadamente, es posible lograr un control preciso y rápido de la variable controlada, como el de la Figura 2-3, frente un escalón unitario, minimizando el error y manteniéndola lo más cerca posible del valor deseado.

El controlador PID es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones, desde el control de temperatura en hornos industriales hasta el control de velocidad en motores eléctricos y muchas otras aplicaciones de control automático. Su versatilidad y capacidad para manejar una amplia gama de sistemas lo convierten en una herramienta esencial en la ingeniería de control, destacándose sobre otros sistemas por sus destacados tiempos de respuestas y sus precisiones, como, por ejemplo, contrastado con un controlador ON – OFF, muy capaz de corregir perturbaciones no previstas y con gran rapidez.

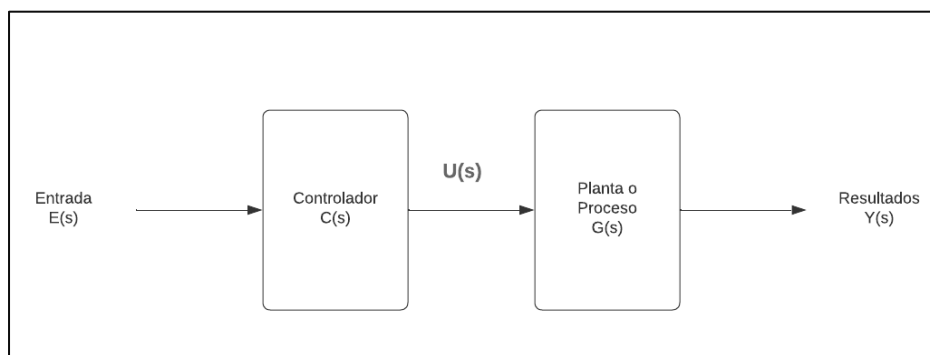


Fuente: Ingeniería de control moderna (P. 678), por K. Ogata (3ra Edición).

Figura 2-3 - Respuesta de controlador PID frente un escalón unitario

2.1.6 Diagrama del lazo abierto de control

Un controlador de lazo abierto, tal como el que se muestra en la Figura 2-4, es un tipo de sistema de control en el cual la acción de control se realiza sin tener en cuenta la salida actual o el estado del sistema. En otras palabras, en un controlador ($C(s)$) de lazo abierto, la entrada de control ($E(s)$) se configura para generar una respuesta ($Y(s)$) deseada sin tomar en cuenta la retroalimentación o el seguimiento del estado real del sistema posterior a su paso por la planta de procesos ($G(s)$).



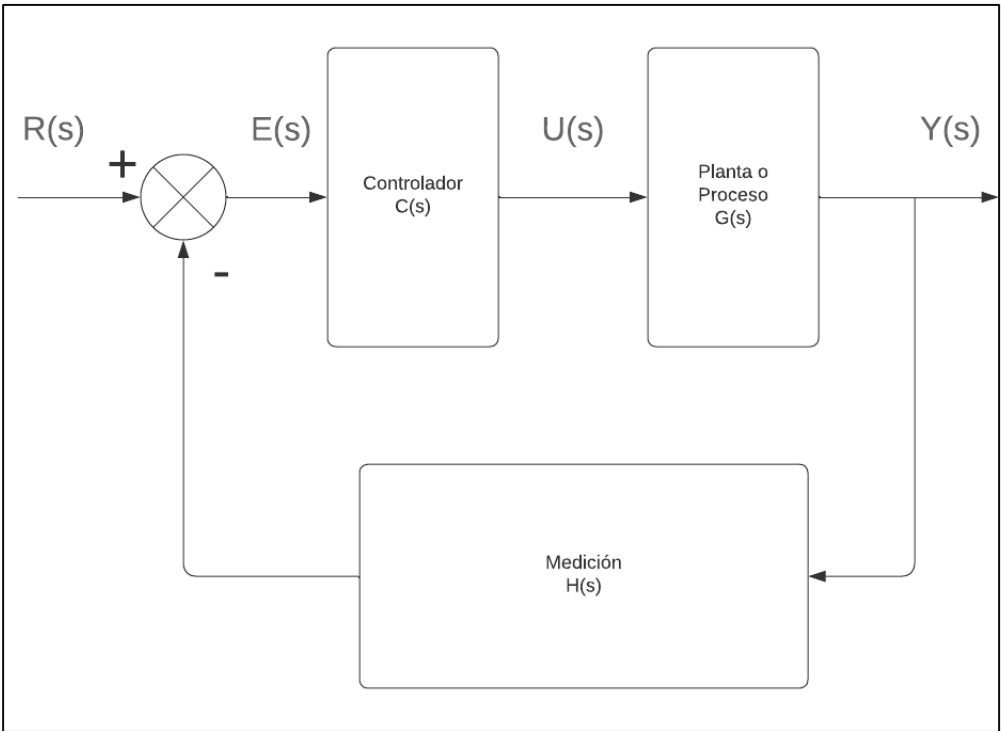
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-4 - Planta de procesos a lazo abierto

Es importante destacar que, debido a su falta de corrección automática y sensibilidad a perturbaciones, los sistemas de control de lazo abierto no son adecuados para aplicaciones donde la precisión y la estabilidad son críticas. En muchas aplicaciones industriales y de automatización, se prefieren los sistemas de lazo cerrado, que utilizan retroalimentación para ajustar la acción de control ($U(s)$) en función de las condiciones en tiempo real y garantizar un rendimiento más preciso y robusto.

2.1.7 Diagrama del lazo cerrado de control

Un sistema de control de lazo cerrado (Figura 2-5), es un tipo de sistema de control en el cual la acción de control se ajusta continuamente utilizando información en tiempo real sobre el estado del sistema. En otras palabras, en un controlador de lazo cerrado ($C(s)$), se realiza una retroalimentación constante ($H(s)$) para comparar la salida ($Y(s)$) real del sistema con la salida deseada ($R(s)$) y, en función de esa comparación ($E(s)$), se ajusta la entrada de control para minimizar cualquier diferencia entre ambas hacia la planta de procesos ($G(s)$).



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-5 - Planta de procesos a lazo cerrado

En resumen, un sistema de control en lazo cerrado es esencial en situaciones en las que se requiere un alto grado de precisión y corrección en tiempo real para mantener una variable controlada (como temperatura, velocidad, nivel, etc.) en un valor deseado.

2.2 PREPARACIÓN DE INSTRUMENTAL ELECTRÓNICO

El controlador lógico programable (PLC) a disposición, es el Phoenix Contact modelo PLCNext control (Figura 2-6), que es un equipo desarrollado por Phoenix Contact, empresa alemana especializada en soluciones de automatización industrial y tecnologías de conexión. El PLCNext Control es parte de la serie PLCNext Technology de Phoenix Contact y se diferencia de los PLCs tradicionales en que utiliza una arquitectura basada en Linux y permite la programación en varios lenguajes de programación, incluyendo lenguajes de alto nivel como C++ y Python, además de los lenguajes de programación de PLC convencionales como el ladder logic (LD) y el Structured Text (ST).

Con este equipamiento se realizará el control y manejo de la variable de nivel de la estación de trabajo académica, con la cual será necesaria la utilización de un controlador PID, cuyo propósito fundamental es hacer que el error en estado estacionario sea cero.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-6 - PLCNext Control de Phoenix Control disponible en la Universidad

2.2.1 Módulos de entradas/salidas de características análogas/digital

Los módulos de entrada o salida son dispositivos que se intercomunican con el controlador electrónico de forma acondicionada con respecto a su interacción con el exterior. En caso del módulo de entrada análoga, éste transforma las señales análogas que capta en el exterior y lo transforma en una señal digital de 12 bits hacia el PLC, en un lenguaje de común entendimiento y que logra percibir de forma adecuada para su posterior procesamiento. En el presente proyecto se hará uso de cuatro módulos de entrada y salida, siendo los expuestos a continuación y en la Figura 2-7.

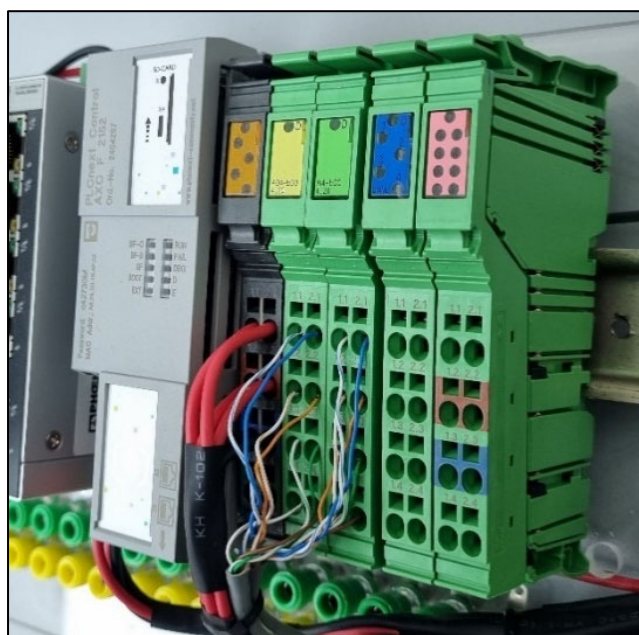
I. Módulo de entrada análoga (IB IL AI 4/I/4-20-ECO – Módulo), es un dispositivo utilizado en aplicaciones de automatización industrial para adquirir señales analógicas de corriente (4 a 20 mA) y convertirlas en señales digitales que pueden ser procesadas por controladores lógicos programables (PLC's) u otros dispositivos de automatización. Su principal característica es que está diseñado para aceptar hasta 4 señales analógicas de corriente en el rango de 4 a 20 mA. Estas entradas son comunes en aplicaciones industriales donde se monitorean variables como la temperatura, presión, nivel, velocidad, entre otras.

II. Módulo de salida análoga (IB IL AO 4/I/4-20-ECO – Módulo), es otro dispositivo utilizado en aplicaciones de automatización industrial, pero en este caso se trata de un módulo de salida analógica. A diferencia del módulo anterior (IB IL AI 4/I/4-20-ECO), que era un

módulo de entrada analógica, este módulo se utiliza para generar señales analógicas de corriente en el rango de 4 a 20 mA. Para este caso, el equipo proporciona 4 canales de salida analógica que pueden generar señales de corriente en el rango de 4 a 20 mA. Estas salidas analógicas se utilizan comúnmente para controlar dispositivos como válvulas, motores, actuadores y otros dispositivos que requieren una señal analógica para su operación.

III. Módulo de entrada digital (IB IL 24 DI 4-ME – Módulo), es un módulo de entrada digital que se utiliza para integrar señales digitales en el sistema de control o en la red de automatización. Es un módulo Inline con 4 canales de entrada digital (DI). Específicamente este módulo es para entrada digital, lo que implica que puede recibir señales de tipo On/Off o de estado lógico (0 o 1). Este módulo, al ser parte de la serie Inline Bus, está diseñado para ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial, donde se requiere la lectura de señales digitales para controlar o monitorear dispositivos.

IV. Módulo de entrada digital (IB IL 24 DO 8/HD-PAC – Módulo), es otro módulo fabricado por Phoenix Contact, diseñado para ofrecer salidas digitales en sistemas de automatización industrial. Además, es un módulo Inline con 8 canales de salida digital (DO) configurables y extensibles, con características específicas del dispositivo, como una mayor capacidad de conmutación o potencia en las salidas digitales, como para controlar dispositivos que requieran señales de salida digitales, como relés, actuadores, o para cualquier aplicación que necesite conmutar señales digitales para el control de procesos o maquinaria.

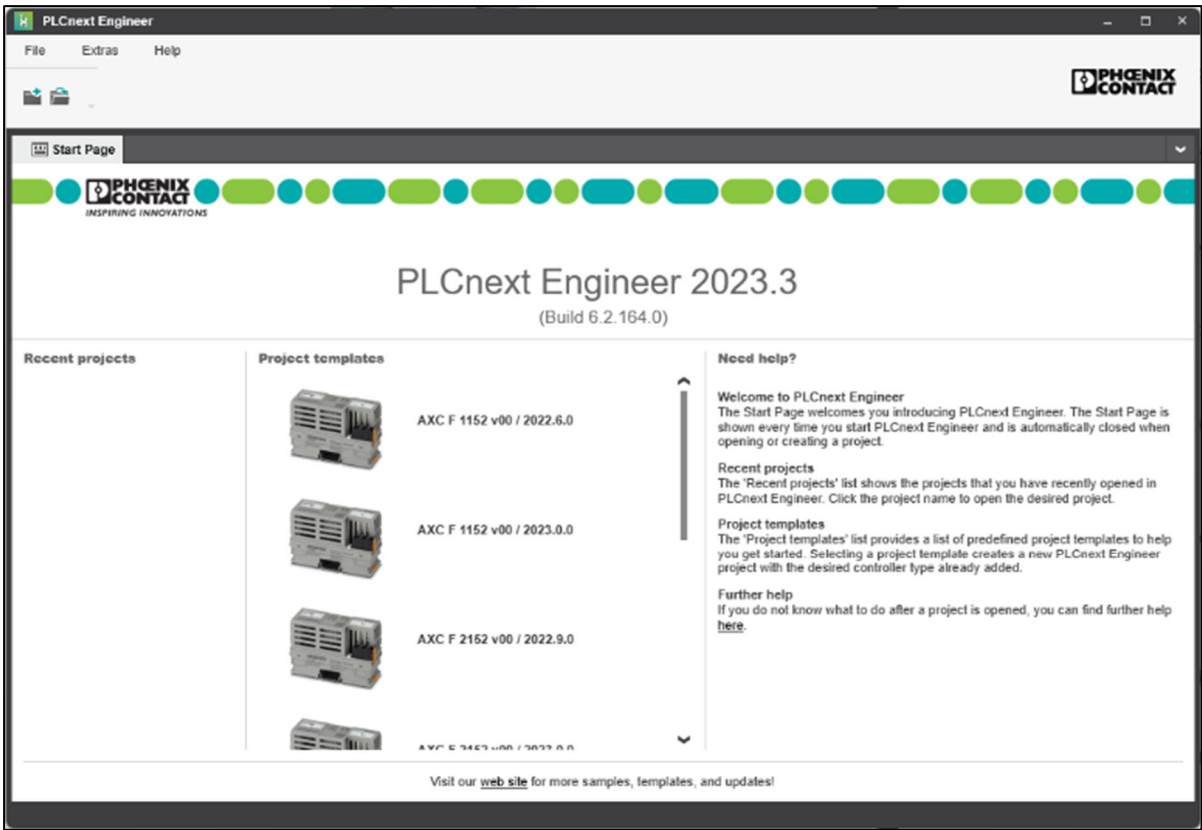


Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-7 - Módulos I/O Análogos y digitales para PLC Phoenix Contact

2.2.2 Desarrollo digital

PLCNext Engineer (Figura 2-8) se utilizará como la herramienta informática para la programación del PLC. Esta será en su versión 2023.3 y tendrá como objetivo desarrollar el algoritmo capaz de soportar la programación adecuada al controlador PID de lazo cerrado para la variable de nivel de la estación de pruebas de la Figura 1-7. Detallando a continuación los preparativos para lograr la vinculación entre el laptop y el banco de pruebas, para así conseguir el fin.



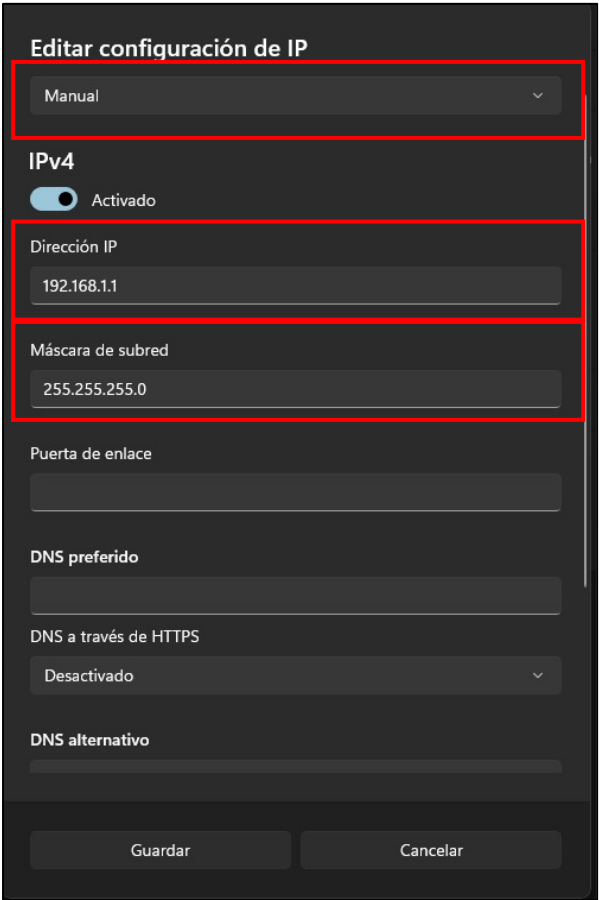
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-8 - Software de desarrollo para el PLCNext Control

2.2.2.1 Configuración de Windows

Colocar dos o más equipos en la misma subred es fundamental para que puedan comunicarse directamente entre sí. Una subred TCP/IP es una porción lógica de una red de computadoras, donde los dispositivos tienen direcciones IP similares. Estas direcciones IP compartidas dentro de una subred permiten una comunicación eficiente y directa entre los dispositivos conectados a esa subred.

Al tener la misma subred, los dispositivos pueden enviar y recibir datos sin necesidad de pasar por un enrutador u otros dispositivos intermedios. En este caso, lo primero y lo más crucial para la comunicación directa entre la computadora y el PLC, donde se requiere compartir datos o información, como muestra la Figura 2-9, es configurar el computador para que opere dentro de la misma sub-red de trabajo, y definir su IP con la de “192.168.1.1”, y así poder efectuar modificaciones al dispositivo de forma local.

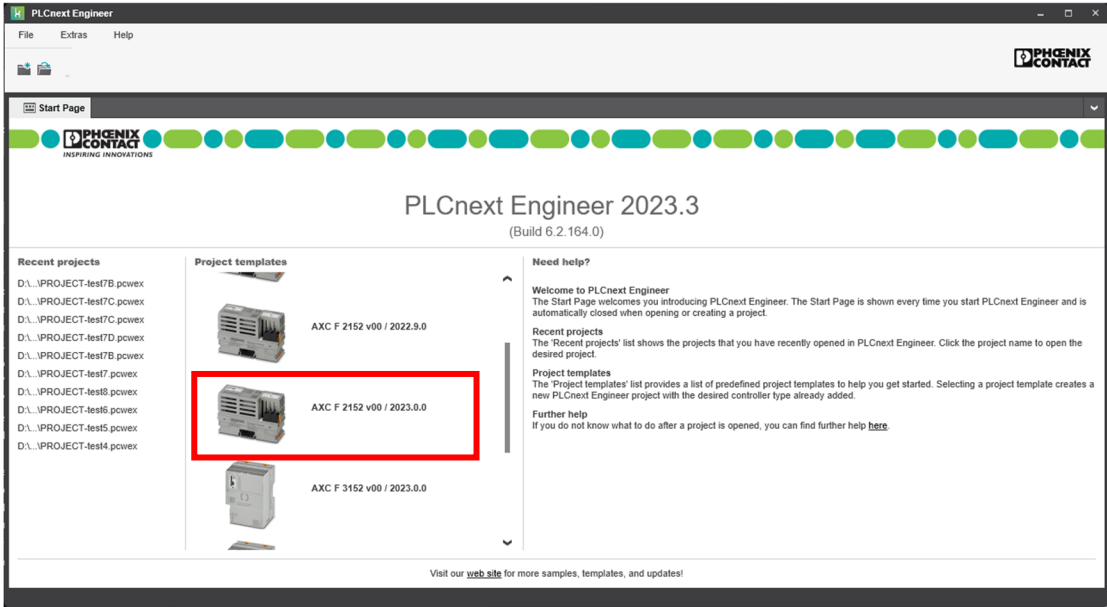


Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-9 - Edición de configuración de IP, determinada bajo misma red que PLC

2.2.2.2 Iniciar proyecto en PLCNext Engineer

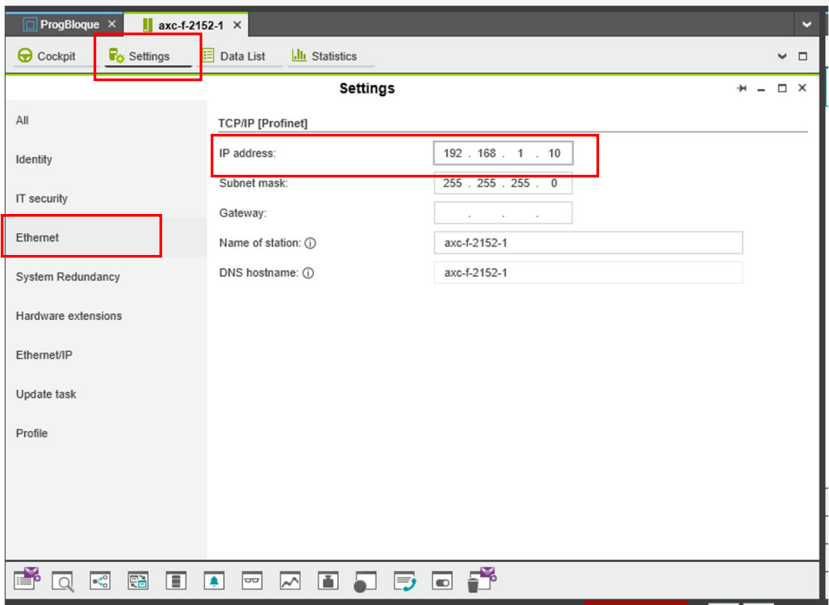
Lo segundo que se debe hacer, es iniciar con un nuevo proyecto en el aplicativo del PLC, preferentemente usando las bases de las planillas predefinidas anteriormente, teniendo las precauciones de elegir el modelo que se usa (AXC F 2152), además de su versión (V0.0) y su firmware correspondiente (FW2023.0.0), tal como se señala en la Figura 2-10.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-10 - Pantalla de inicio PLCNext Engineer 2023

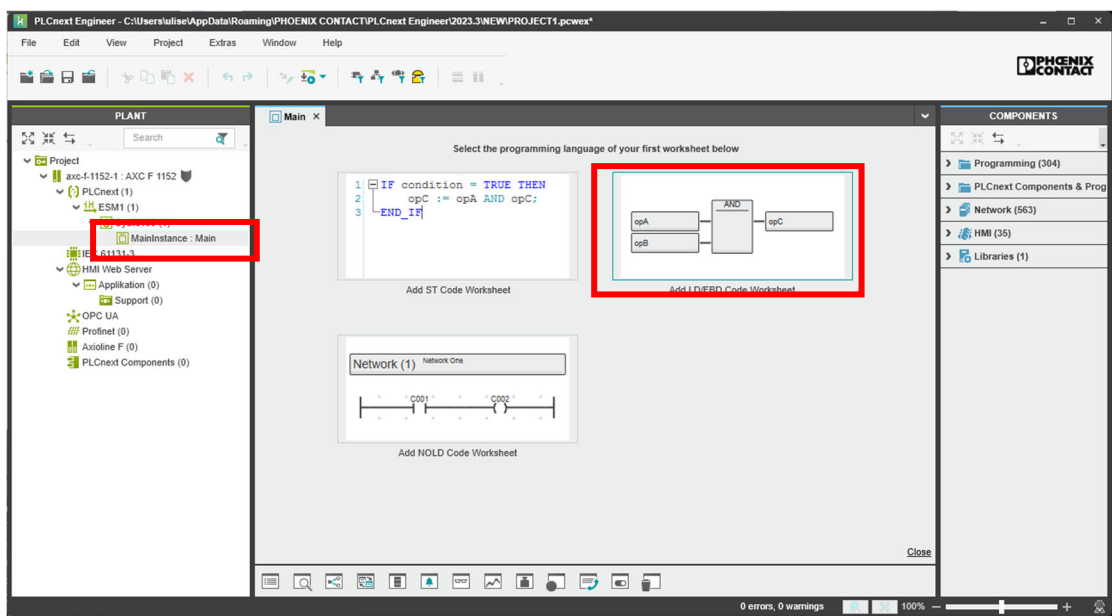
A continuación, y con la plantilla precargada, se debe definir y seleccionar la red donde trabajará el PLC de forma manual, en concordancia con la IP de Windows, anteriormente dicha, en este caso, se eligió la IP 192.168.1.10 (Figura 2-911).



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-11 - Parámetros de ajustes y configuración para la vinculación entre PLC y Computadora portátil

Posteriormente, y con los procedimientos anteriormente descritos, ya se debe iniciar una hoja de trabajo en base al lenguaje de programación “LD/FBD Code”, el cual, permitirá a través de un lenguaje altamente intuitivo, lograr programar el trabajo de programación (Figura 2-12).



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-12 - Parámetros de ajustes y configuración para la vinculación entre PLC y Computadora portátil

2.2.3 Modelamiento del sistema a lazo abierto

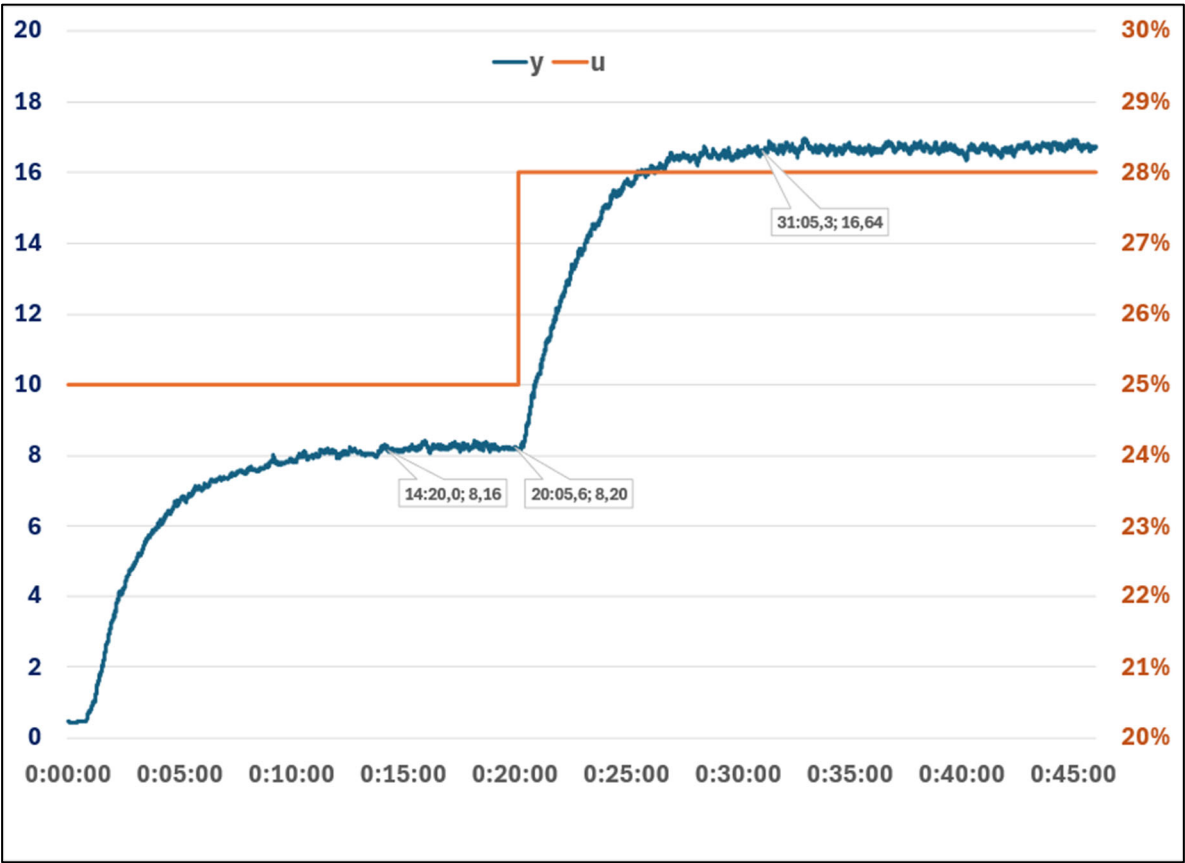
Una vez realizados los pasos previos, y quedando en condiciones para desarrollar el programa que soporta el controlador PID y apoyándose en las herramientas informáticas de identificación de sistemas para plantas, se realiza el modelamiento del sistema, con un lazo abierto, sin la implementación de un sistema con retroalimentación, generando pequeños brincos del punto de operación y realizando mediciones de sus reacciones. Tal como se observa en la reacción de la planta (Figura 2-13), ante un escalón o brinco, en la cual de forma manual se realiza el cambio del punto de operación y registrando los cambios en el nivel de agua.

Resulta relevante mencionar que los saltos de operación, cada uno con un porcentaje de apertura del 3%, se derivan de una característica inherente a la estructura de la válvula proporcional. La naturaleza de esta válvula impide la ejecución de saltos de menor magnitud sin

provocar efectos adversos en el desplazamiento interno de sus piezas, definido por la asociación internacional de automatización (ISA) como banda muerta (Deadband).

Esta limitación en los saltos de operación del 3% se origina en la arquitectura y el diseño de la válvula proporcional, que, debido a sus componentes internos y su funcionamiento, establece este margen mínimo para operar sin comprometer la integridad y la precisión de su funcionamiento. Reducir los saltos de operación por debajo del 3% podría influir en el rendimiento y la estabilidad de la válvula, alterando su capacidad para regular el flujo de manera efectiva y precisa, lo cual impactaría su correcto desempeño en el control de los procesos para los que ha sido diseñada.

Debido a que la mayoría de las acciones de control, para el control regulatorio consisten en pequeños cambios, de 1 % o menos, una válvula de control con una banda muerta excesiva podría ni siquiera responder a muchos de estos pequeños cambios. Una válvula bien diseñada debe responder a señales del 1%, o menos, para proporcionar una reducción efectiva en la variabilidad del proceso. Sin embargo, partiendo de la base, que se planteó como objetivo general, que fue la utilización del banco de pruebas multivariables disponibles en la institución, se prosigue con las pruebas, continuando con el foco de dar una solución, mediante la regulación del nivel utilizando una válvula proporcional, analizando mas tarde si la banda muerta del presente actuador genera cambios significativos en los resultados finales.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-13 - Pruebas operacionales a lazo abierto

Otra información relevante para mencionar es que, a partir de estas pruebas, se evidencia que el sistema utilizado no cumple con los requisitos de linealidad, lo que sugiere que opera como un sistema no lineal. Esta conclusión se basa en la falta de conformidad del sistema con las condiciones típicas que los sistemas lineales suelen cumplir.

Los sistemas lineales se caracterizan por cumplir con propiedades específicas, como la superposición y la homogeneidad, condiciones que no parecen cumplirse en el sistema bajo análisis. La observación de comportamientos que divergen de estos principios lineales sugiere la presencia de no linealidades en el sistema, lo que puede influir en su comportamiento dinámico, siendo esencial considerar esta característica al diseñar estrategias de control y análisis del sistema en cuestión.

En el presente sistema se considerará lineal si satisface dos propiedades fundamentales: la propiedad de homogeneidad y la propiedad de Superposición.

1. Homogeneidad: El sistema es homogéneo si, al multiplicar la entrada por un escalar, la respuesta también se multiplica por ese mismo escalar. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$F(a * x) = a * F(x)$$

Donde:

- **F** es la respuesta del sistema.
- **x** es la entrada al sistema.
- **a** es un escalar

Resultando si se elige un punto de operación (25%, 8.2cm), y se multiplica la entrada y la respuesta del sistema por el escalón de 3% de apertura, equivalente a multiplicarlo por 1,12, resulta empíricamente (Figura 2-13) que:

$$F(1,12 * 25\%) = 1,12 F(25\%)$$

$$F(28\%) = 1,12 * 8.2cm$$

$$16.7cm \neq 9.18cm$$

2. Superposición: El sistema cumplirá con la condición de superposición si la respuesta a la suma de dos entradas es igual a la suma de las respuestas a cada entrada por separado. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$F(x1 + x2) = F(x1) + F(x2)$$

Donde:

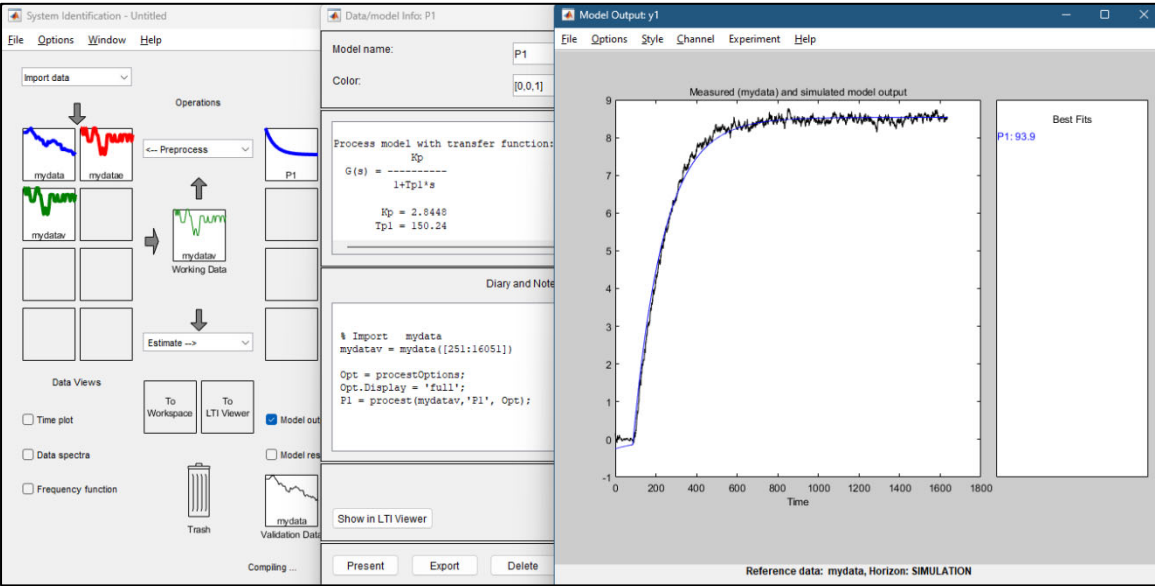
- **F** es la respuesta del sistema.
- **x1** y **x2** son dos entradas diferentes.

$$F(25\% + 28\%) = F(25\%) + F(28\%)$$

$$F(53\%) = 8.2cm + 16.7cm$$

$$''Valor mayor que 50cm'' \neq 30cm$$

De lo cual, se puede afirmar que no tiene la propiedad homogeneidad o la propiedad de superposición, descartando empíricamente las condiciones necesarias para cumplir los requisitos de linealidad.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-14 - Utilización del aplicativo System Identification para el modelamiento de la función de transferencia de la planta

Para el procedimiento de modelamiento, se usa, como se muestra en la Figura 2-14, el uso de la aplicación de alta tecnología, como la del “System Identification”, un aplicativo integrado en el software Matlab, que sirve, entre otras funciones, para el modelamiento de funciones de transferencias de plantas, y además, para su linealización, la cual, para el presente

proyecto, se utilizó para el modelamiento de la planta en lazo abierto, en el punto de operación (25%, 8.2cm), entregando una asertividad del 93.9% de similitud, con un modelo de aproximación de 1er orden.

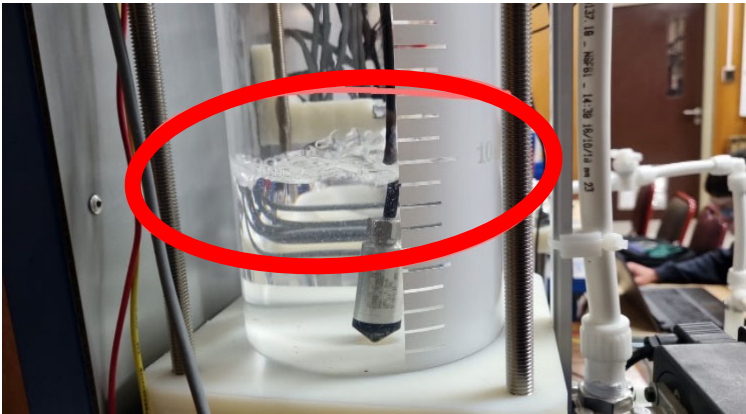
$$G(s) = \frac{2.85}{150.24s + 1}$$

La utilización de MATLAB permite realizar análisis, simulaciones y cálculos precisos que facilitan la obtención de la función de transferencia de la Planta. Esta función es fundamental en el diseño del controlador, ya que servirá de base para comprender y predecir la respuesta del sistema ante las señales de control generadas por el controlador PID. Posteriormente, esta información se empleará en la sintonización de los parámetros del controlador PID, lo cual resulta crítico para lograr un funcionamiento óptimo del sistema, ajustando estos parámetros para mejorar el rendimiento, la estabilidad y la respuesta del sistema de control.

2.2.4 Programación del sistema a lazo cerrado

Como cuarto paso, y ya realizados los primeros tres, se debe realizar el algoritmo (Figura 2-16), capaz de soportar el programa encargado de controlar el sistema de nivel por medio del controlador PID definido (Independiente de su sintonización correspondiente).

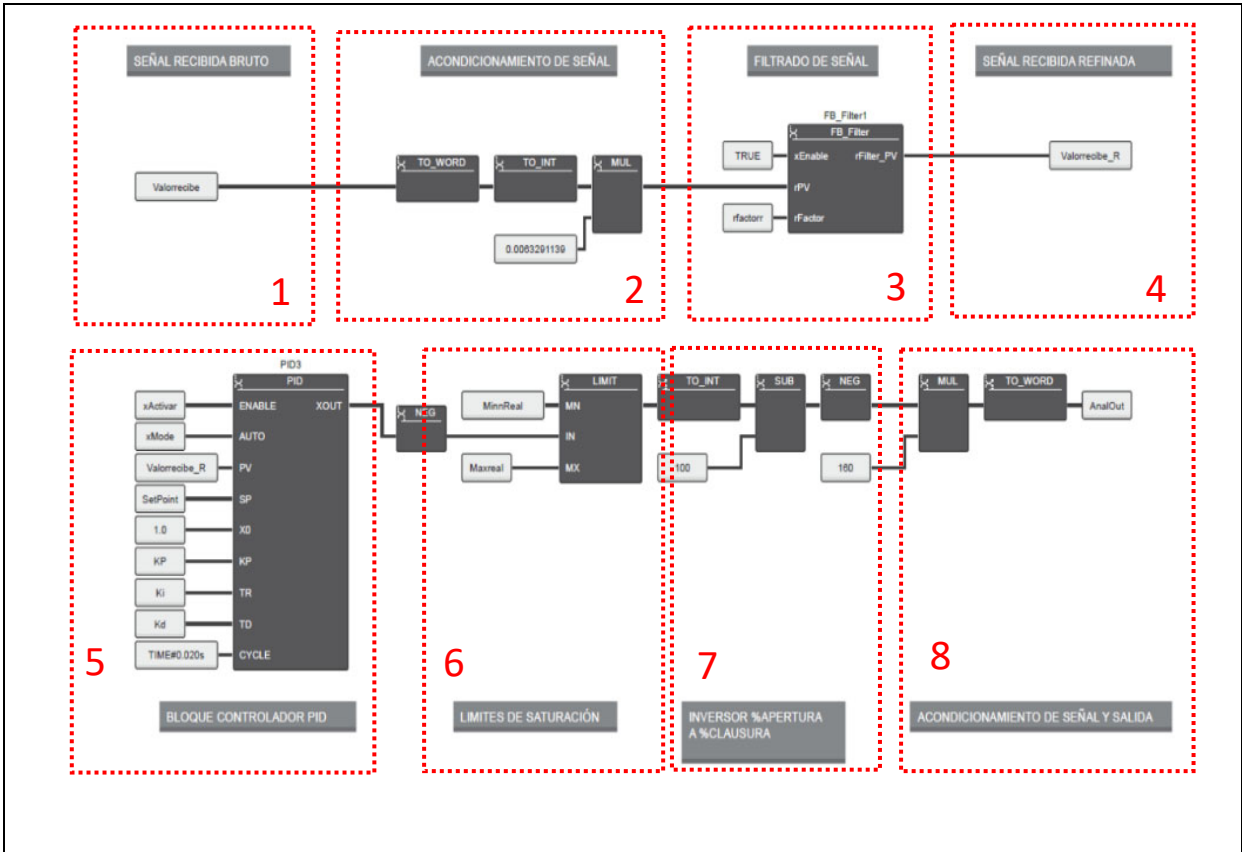
Realizando una explicación generalizada, el programa se divide principalmente en 5 bloques de funciones. El primero de los bloques, es la recepción del sensor de entrada, comunicado con el módulo de entrada analógico a digital de la Figura 2-7, el cual convierte la señal física analógica de 16 bits del sensor a un valor decimal entero con signo, de representación estandarizada, de entre 0 y 16000, para el rango de 4 a 20 mA respectivamente. En segundo lugar, se encuentra la etapa de acondicionamiento de señal, en la cual se toma el valor en crudo y se multiplica por una pendiente calculada para obtener una relación de salida en centímetros (nivel del estanque). En tercer lugar, está la etapa donde se filtra este valor digital acondicionado y se elimina parcialmente el rizado de la señal a causa de los ruidos de los cables y de las turbulencias del agua en la caída desde su punto de ingreso hasta el canto inferior, tal cual se puede ver en la Figura 2-15.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-15 - Captura de la turbiedad detectado por el sensor de presión

En cuarto lugar, está la etapa donde se transmite una señal acondicionada y filtrada hacia el controlador PID. Y por último lugar, está la etapa donde se encuentra el controlador PID, donde se puede subdividir en el proceso o “bloque controlador PID”, el cual se configura para que realice óptimamente la regulación del nivel de agua. Luego, esta señal es limitada por el siguiente proceso, que se encarga de poner los límites reales de las capacidades del actuador, en este caso, permite definir que la válvula no se abre más del 100%, y que no se cierra menos del 0%.



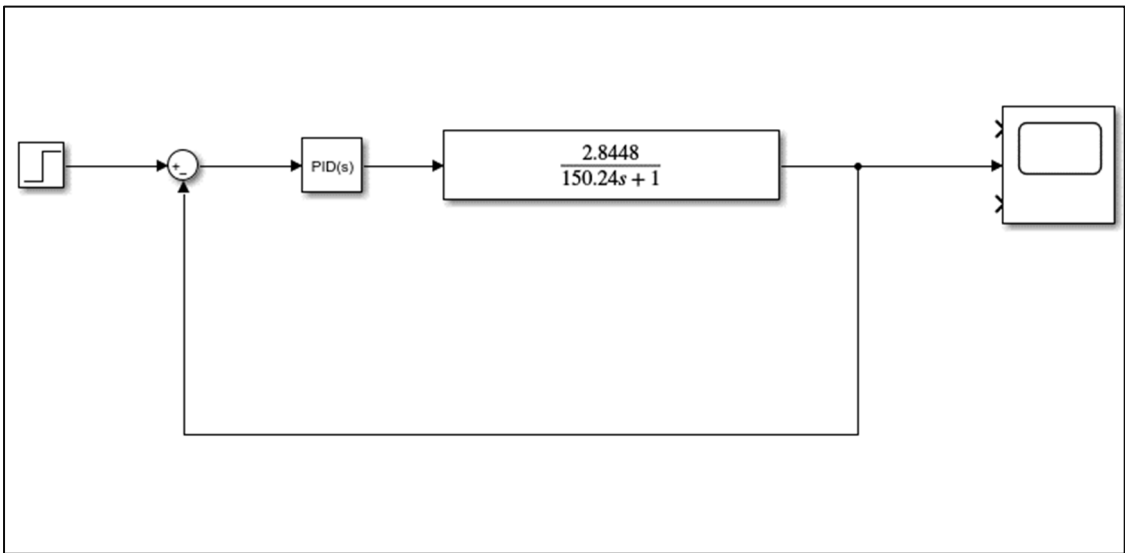
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-16 – Programación del control PID controlador de nivel

La etapa con la que se continúa es la de invertir la lógica del actuador, convirtiendo la perspectiva de la válvula, es decir, convertir el porcentaje de apertura a porcentaje de clausura del equipo. Y finalmente, en último lugar, está la etapa de acondicionamiento de señal de salida, que tiene la importancia de convertir y escalar el valor de salida en mA, y poder manipular la acción del actuador, en este caso, la válvula proporcional.

2.2.5 Sintonización de parámetros con PID TUNER

La sintonización de un controlador PID es esencial para lograr un control preciso y eficiente de sistemas y procesos en una amplia gama de aplicaciones, desde la automatización industrial hasta el control de temperatura, presión, nivel, velocidad, entre otros. La importancia de la sintonización radica en su capacidad para mejorar el rendimiento del sistema, garantizar la estabilidad y cumplir con los requisitos específicos de cada aplicación.

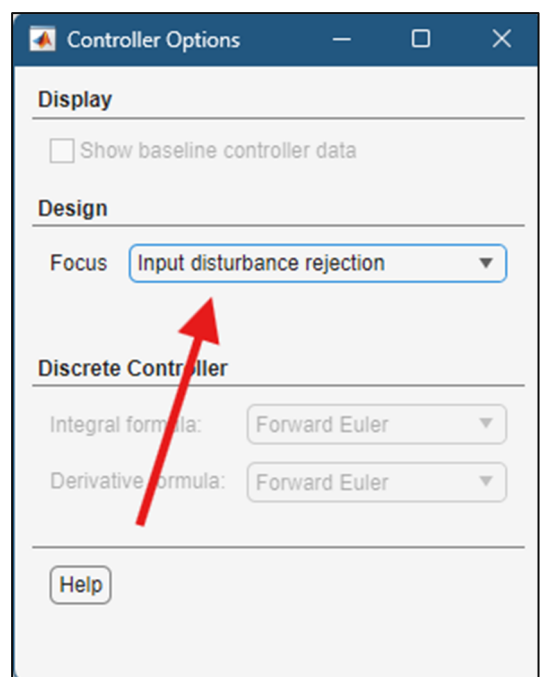


Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-17 - Controlador de la planta a lazo cerrado, elaborado en Simulink

En un primer paso, se procede a simular la planta con el lazo de control cerrado (Figura 2-17), integrando la función de transferencia correspondiente a la planta en la configuración de lazo abierto, obtenida anteriormente en la Figura 2-14 mediante la función "System Identification" de la herramienta MATLAB. Posteriormente, se empleará la extensión "PID TUNER" (Figura 2-199) disponible en la aplicación Simulink para llevar a cabo el proceso de sintonización del controlador de forma automática, con un enfoque en el rechazo de

perturbaciones de entradas, según las alternativas disponibles en su configuración, tal cual se ve en la Figura 2-18.



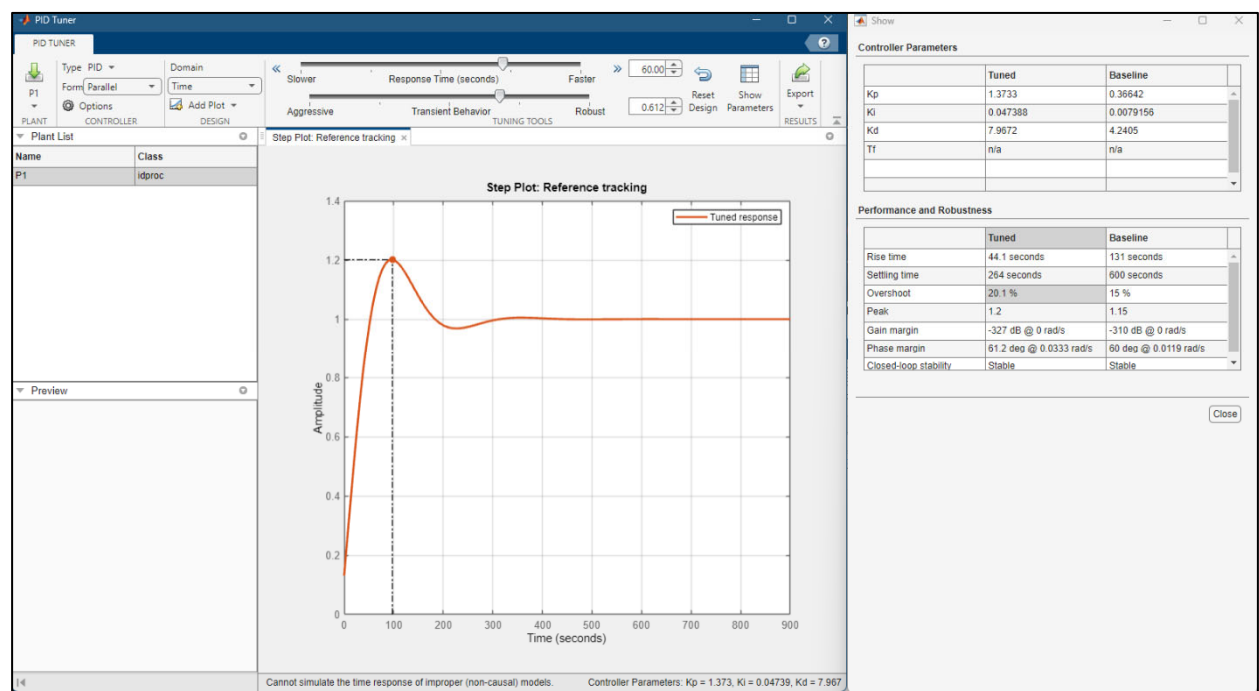
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-18 -Configuración del foco del sintonizador automatico PID

En el presente controlador, se implementó con un método de sintonización automático (Quick-tuning), pero con un perfil y/o enfoque de sintonización denominado 'INPUT DISTURBANCE REJECTION', el cual, a posterioridad, se ajustó de forma manual para tener mayor rapidez y robustes, con características para rechazar perturbaciones, similar al método de sintonización manual Ziegler-Nichols. El ajuste se realiza de manera manual, reflejando la respuesta de la planta en la Figura 2-19, en el cual se orienta su desempeño a características que compatibilicen su tiempo de reacción versus su peak de reacción.

Esta simulación del sistema en lazo cerrado es crucial para evaluar y comprender el comportamiento del controlador en conjunto con la planta en un entorno simulado. La función de transferencia de la planta a lazo abierto obtenida a través de la identificación del sistema permite modelar su dinámica de manera precisa. Luego, la herramienta "PID TUNER" de Simulink se utiliza para sintonizar los parámetros del controlador proporcional integral derivativo (PID), la cual es la seleccionada por motivos posteriormente justificados, donde se comparan la teoría de un controlador PID versus la de un controlador PI, los cuales tienen una diferencia por el contexto material del proyecto, obteniendo en este primer caso, los siguientes datos:

- **Kp** = 1.37
- **Ki** = 0.047
- **Kd** = 7.97



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 2-19 - Sintonización de parámetros para el cálculo del controlador PID

La utilización de la herramienta del PID Tuner permite no solo hacer un cálculo de un controlador de forma automatizada y moderna, aprovechando las capacidades computacionales de la tecnología, sino también permite ajustar con precisión los parámetros del controlador, como la constante proporcional, integral y derivativa, lo que resulta en una configuración óptima del controlador. El objetivo primordial es mejorar la estabilidad, precisión y respuesta de la actuación del sistema de control, mostrada en el capítulo 3, Figura 3-5, en la cual se ve que, si bien su frecuencia de conmutación es alta, esta respuesta no llega a los puntos críticos de saturación. Adicionalmente, cabe mencionar que la dificultad de su alta frecuencia de conmutación también será evaluada y resuelta mediante propuestas de mejora.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y MEJORAS A CONSIDERAR

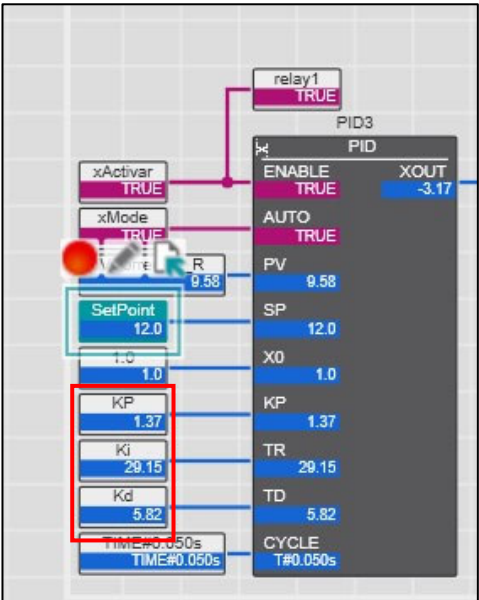
3 **RESULTADOS Y MEJORAS A CONSIDERAR**

Durante el desarrollo del presente trabajo, se aplicaron conocimientos adquiridos mediante el estudio y la investigación, como así también, conocimientos adquiridos durante el periodo académico en la Universidad Técnica Federico Santa María.

A continuación, en este capítulo se analizará y juzgarán los resultados de la calidad del proyecto para la aplicación del control de nivel del banco de pruebas del laboratorio de control industrializado, como también se plantearán las consideraciones a mejorar que no fueron posible de realizar.

3.1 **PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA**

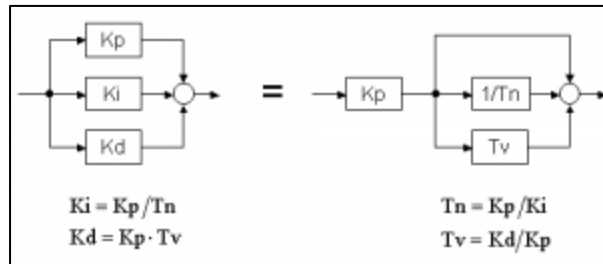
Siguiendo al capítulo 2, se detallarán las configuraciones pertinentes del proyecto, destacando especialmente los valores recomendados por el PID TUNER, los cuales son empleados como ajustes de sintonización en el controlador PID (Figura 3-1). Se busca que el controlador logre una regulación sumamente similar a la simulación realizada en el PID TUNER, evidenciando así una sintonización efectiva y reflejando la respuesta deseada en el sistema de control.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-1 - Bloque de programación PID, con la señalización de los parámetros KP, Ki y Kd

El presente bloque de control PID, aportado por el software de programación del mismo PLC, es el bloque “PID / PID_LTIME”, el cual, dentro de él, asemeja un control PID del tipo no interactivo, donde es de la forma (Figura 3-2):



Fuente: https://testcon.info/EN_BspPID-Regler.html

Figura 3-2 - A la izquierda controlador PID de la forma paralela y a la derecha un controlador del tipo no interactivo o convencional

Quedando la función de transferencia del controlador PID de tiempo continuo de la forma no interactiva o convencional, de la siguiente forma:

$$C_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_n s} + T_d s \right)$$

Donde:

U(s): Salida del controlador PID.

E(s): Error en la planta.

Kp: Acción proporcional del controlador PID.

Tn=Tr: Constante de tiempo de reinicio (factor de tiempo del término integral)

Tv=Td: Constante de tiempo derivativo

Ki: Acción integral del controlador PID.

Kd: Acción derivativa del controlador PID.

Considerando lo expuesto, la diferencia en la operación de la herramienta, que se rige por los términos de un controlador PID Paralelo, y el controlador del PLC, que opera bajo los términos de un controlador no interactivo, conlleva la necesidad de aplicar las siguientes fórmulas de conversión. Esta distinción en los enfoques de control requiere una adecuada transición entre los dos sistemas para garantizar una integración efectiva. En este contexto, se hace imperativo emplear las fórmulas de conversión que facilitarán la interpretación y la correlación de los datos entre los dos tipos de controladores. Este proceso de conversión no solo es esencial para la coherencia en la interpretación de las señales, sino que también asegura la continuidad operativa y la eficiencia en la implementación conjunta de ambos sistemas de control. La aplicación de estas fórmulas de conversión constituye un paso crítico para garantizar la sincronización y el rendimiento óptimo en el entorno de control dual.

$$Tn \text{ ó } Tr = \frac{Kp}{Ki} \quad \text{y también} \quad Tv \text{ ó } Td = \frac{Kd}{Kp}$$

Obteniendo como resultado, que en los puntos de conexión Kp, Tr y Td, se desarrollen de las fórmulas anteriormente mencionadas, quedando con los valores tal como se ve en la Figura 3-1.

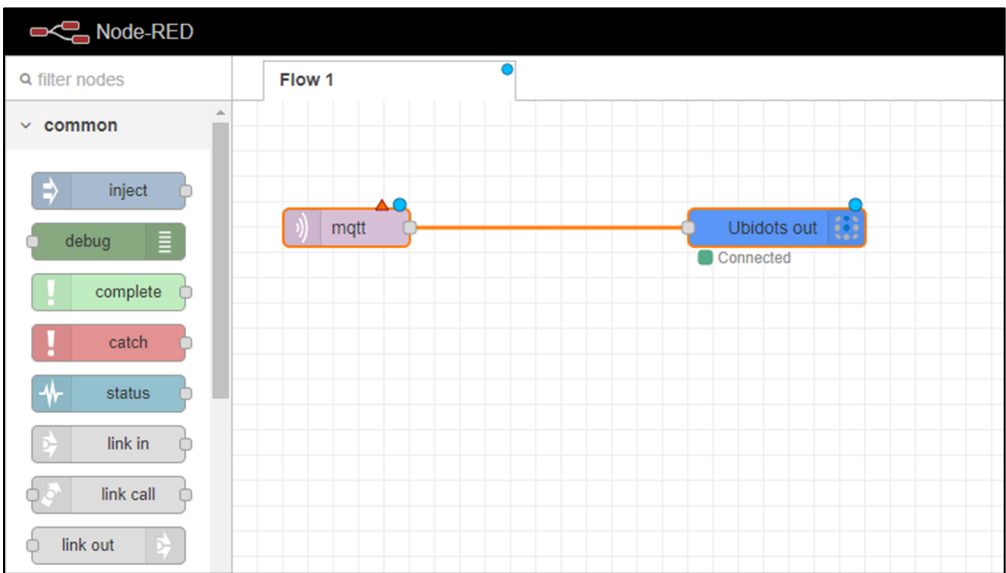
$$Tn \text{ ó } Tr = \frac{Kp}{Ki} = \frac{1.37}{0.047} = \mathbf{29.15} \quad \text{y} \quad Tv \text{ ó } Td = \frac{Kd}{Kp} = \frac{7.97}{1.37} = \mathbf{5.82}$$

En el contexto de controladores o mandos, el término "windup" se refiere a un fenómeno asociado con sistemas de control y retroalimentación. El windup ocurre cuando hay un desfase significativo entre la salida del sistema controlado y la señal de referencia que el controlador intenta seguir. Este desfase puede ocurrir, por ejemplo, cuando hay restricciones físicas en el sistema o cuando el sistema tiene un comportamiento no lineal. En el caso de un controlador, el windup puede manifestarse como un aumento excesivo en la salida del controlador cuando intenta reducir el error acumulado. Si el sistema controlado no puede seguir la referencia debido a limitaciones físicas o restricciones, la componente integral puede acumular un error significativo, lo que lleva a un windup.

Para abordar el windup, se utilizan diversas estrategias, como limitar la acción integral del controlador cuando se alcanzan ciertos límites, o implementar métodos anti-windup para mitigar el efecto del desfase acumulado. Estas técnicas ayudan a mejorar la estabilidad y el rendimiento del sistema de control.

Para el caso del presente trabajo, no fue posible realizar la presente habilitación del sistema windup, debido a que el bloque de control, hasta la fecha, aún no ha sido equipado con dicho sistema de mejora, que permite eficazmente reducir los tiempos de acción mientras reduce el error acumulado, como tampoco se tiene acceso a la visualización de cada uno de los componentes del controlador, tanto la acción proporcional o como la acción integrativa.

En tanto para la comunicación de datos desde el PLC hacia la nube, y desde la nube hacia el PLC, se encuentra la extensión Node-Red, de la cual en la Figura 3-3, se ve el enlace que favorece la exportación hacia la red de los datos hasta la plataforma Ubidots.



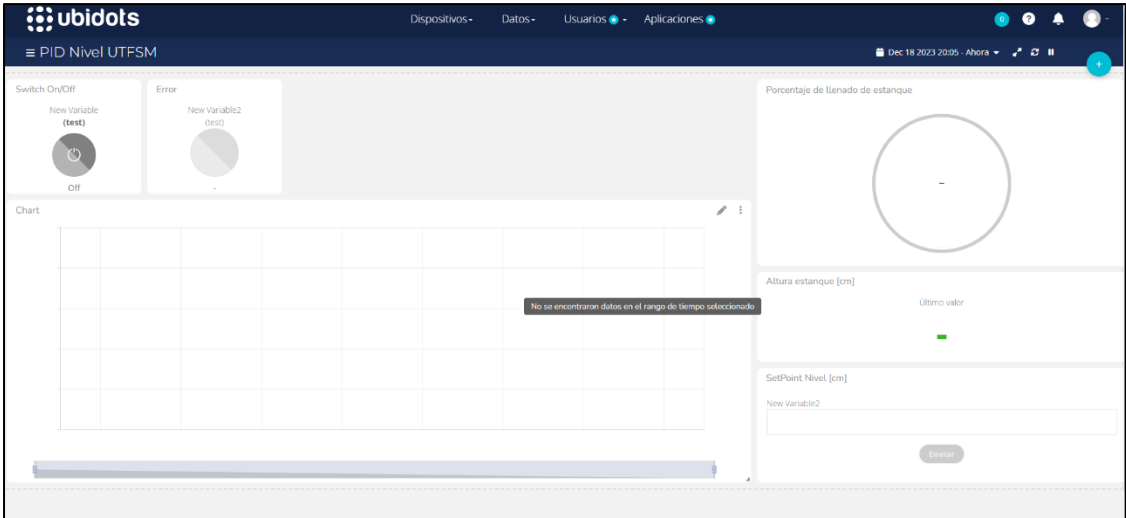
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-3 - Enlace creado en Node-Red para la exportación de datos a Ubidots

Node-RED se destaca como un entorno de desarrollo de código abierto diseñado para la conexión visual de dispositivos, APIs y servicios en línea. Su función principal radica en la creación de flujos de trabajo (flows), simplificando así la integración del sistema de la planta de proceso con la plataforma de monitoreo remoto en red, ejecutada en la plataforma Ubidots.

Esta plataforma no solo posibilita la visualización de datos recolectados desde el PLC, sino que también habilita el control remoto, brindando una representación clara de las posibilidades que estos avances tecnológicos pueden aportar a la industria y a las plantas que buscan una gestión eficiente. La capacidad de visualizar y controlar remotamente los datos a través de los “Dashboard” (o "tablero de control" en español) de Ubidots, que no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también abre nuevas perspectivas para la optimización y

supervisión de procesos industriales, destacando así la versatilidad y el potencial innovador de esta combinación entre Node-RED y Ubidots en el ámbito de la automatización industrial.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-4 - Dashboard creado en Ubidots

El Dashboard, ilustrado en la Figura 3-4, constituye la interfaz gráfica que ofrece una representación visual de información pertinente, métricas clave y datos operativos en tiempo real provenientes del PLC. Este panel se empleará para llevar a cabo el seguimiento del nivel del estanque, el valor del setpoint y otros indicadores cruciales que se presentan de manera intuitiva en un solo lugar. Este Dashboard no solo simplifica la interpretación de datos complejos, sino que también facilita la supervisión efectiva de los aspectos fundamentales del sistema, permitiendo una toma de decisiones informada y eficaz en tiempo real.

3.2 **RESPUESTA DEL SISTEMA**

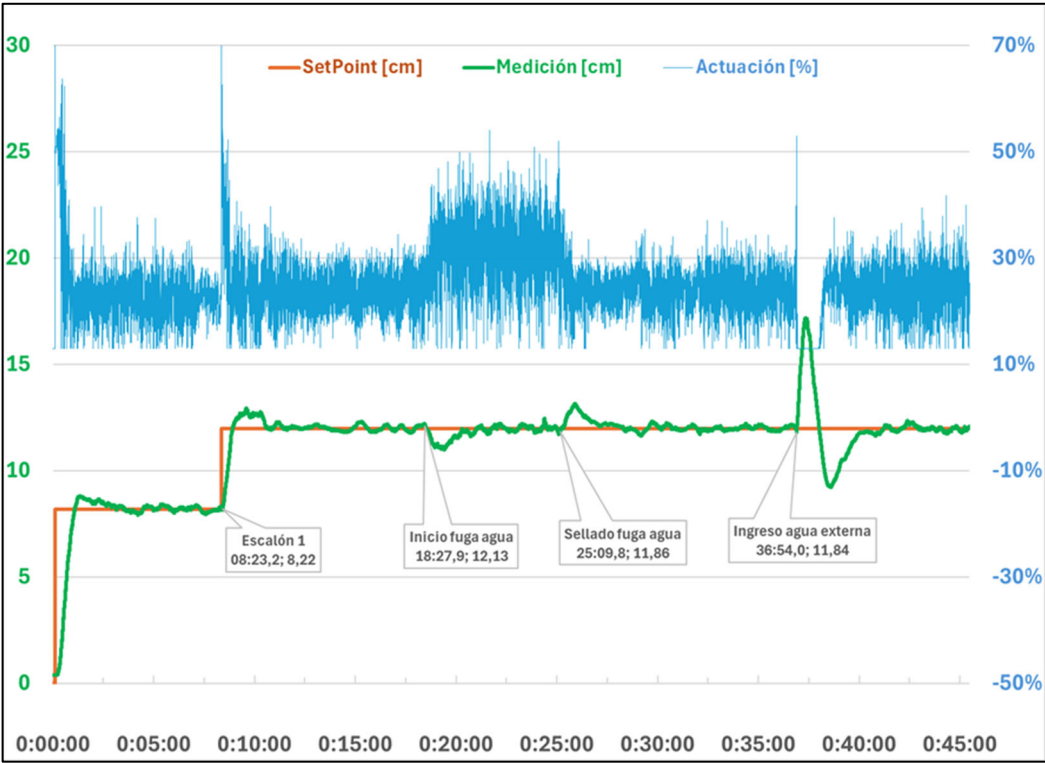
La respuesta de un controlador PID en un regulador de nivel de agua debería ser una salida dinámica que se ajusta en función del error actual, el error acumulado y la anticipación del cambio en el error para mantener el sistema en equilibrio y minimizar las oscilaciones.

A continuación, se exploran las consideraciones prácticas anteriormente descritas para la implementación del controlador PID en un regulador de nivel de agua, así como las adaptaciones según las necesidades específicas de la presente aplicación. Además, se discuten las implicaciones prácticas de los resultados obtenidos y se ofrecerán recomendaciones para la implementación exitosa de esta estrategia de control en entornos del mundo real.

3.2.1 Respuesta del controlador de nivel PID

Para emitir el veredicto sobre el proyecto encargado de implementar el controlador PID, se procede a poner en marcha el sistema desarrollado. En la Figura 3-5 se desprenden los datos resultantes, los cuales se sometieron a un análisis exhaustivo, dividiéndolos en dos aspectos de vital importancia. En primera instancia, se enfocó en la calidad del control del setpoint solicitado, evaluando la capacidad del sistema para mantener un seguimiento preciso y eficaz de las consignas establecidas. En este sentido, los resultados revelaron un desempeño destacado, demostrando la habilidad del controlador PID para ajustar y mantener el sistema en línea con los parámetros deseados.

En un segundo punto, se dirigió la atención hacia la evaluación de la respuesta del sistema frente a estímulos no planificados, particularmente la irrupción de eventos clasificados como perturbaciones. En el caso concreto abordado, la perturbación se materializó mediante el ingreso no planificado de una cantidad específica de líquido externo al sistema bajo control. La reacción del sistema frente a esta perturbación fue mitigada exitosamente (más adelante se analizará el tiempo de duración de la perturbación), demostrando la robustez y la capacidad de adaptación del controlador PID ante situaciones no previstas.



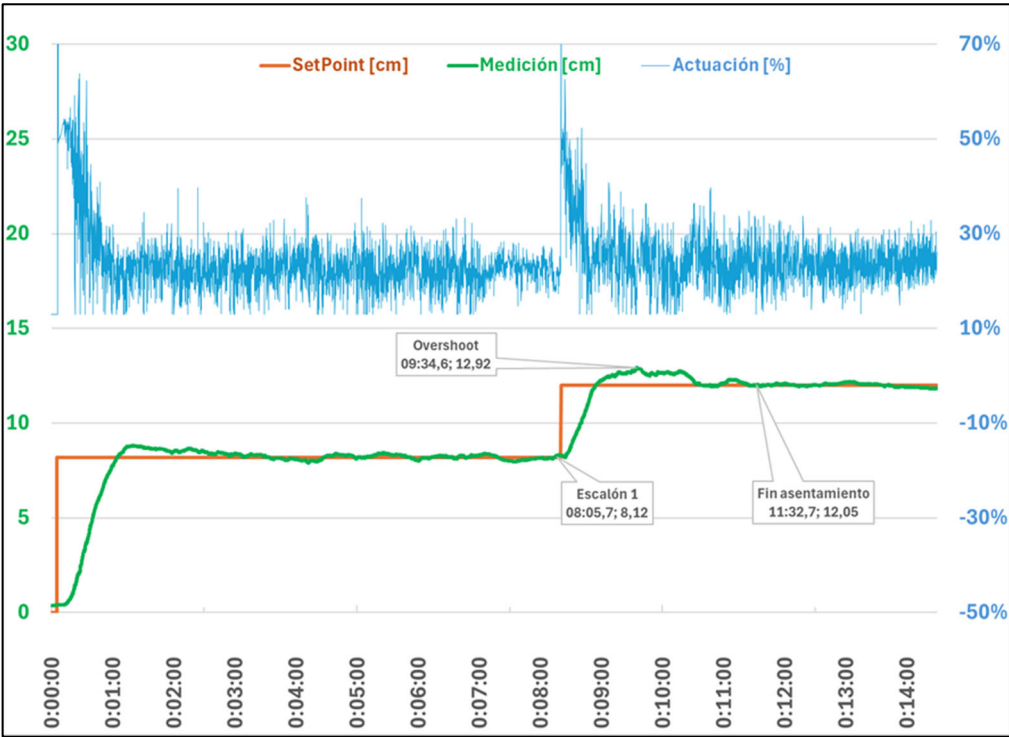
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-5 - Pruebas de control de nivel con controlador PID

A partir de los datos proporcionados por la Figura 3.5, se destaca que el tiempo de asentamiento registrado menor que los 264 segundo esperados, siendo de 3 minutos y 28 segundos o 208 segundos. Este intervalo temporal se generó como resultado de un cambio abrupto en el setpoint, pasando de 8,2 cm de altura a 12 cm, alcanzando finalmente este. Este salto en la consigna permitió evaluar la capacidad del sistema para adaptarse y estabilizarse ante cambios bruscos en las condiciones de operación.

Para el caso del indicativo de sobrepaso, o comúnmente llamado overshoot o MP, según los datos analizados de las pruebas anteriores, se ve un $MP < 20\%$, siendo de un 7.5%, inferior a los requerimientos de la Figura 2-19, tanto para el requerimiento de tiempo de asentamiento y máximo overshoot (MP). Cabe recordar, que la anterior simulación es considerando la planta de modo lineal, por lo que mientras más se distancie del punto de operación (25%, 8.2cm), más se distanciará la exactitud de las emulaciones de los modelos.

Este enfoque de sintonización, alineado con sistemas de segundo orden, ha permitido lograr un tiempo de asentamiento aceptable para una planta de nivel, como se evidencia en la Figura 3-6. Aunque no se haya observado un overshoot excesivo en este escenario particular, es esencial tener en cuenta que la adaptación de parámetros para emular sistemas de segundo orden ha influido positivamente en la estabilidad y respuesta del sistema ante cambios significativos en la consigna. Este análisis detallado no solo valida la efectividad del enfoque de sintonización seleccionado, sino que también destaca la importancia de adaptar la estrategia de control a las características específicas de la planta para lograr un rendimiento óptimo.

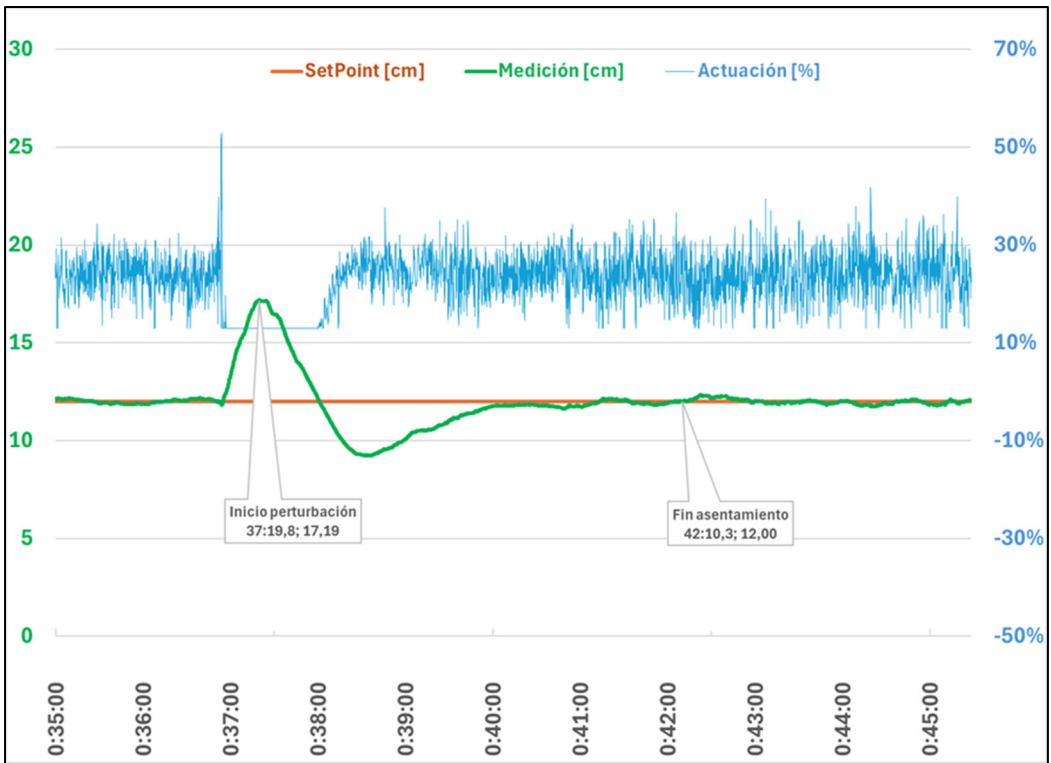


Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-6 - Tiempo de asentamiento del controlador PID

Este ejercicio de evaluación no solo confirma la efectividad del controlador PID en términos de seguimiento de setpoint, sino que también resalta su capacidad para gestionar de manera eficaz perturbaciones externas, garantizando así la estabilidad y el rendimiento continuo del sistema en condiciones dinámicas. En conjunto, estos resultados respaldan la implementación exitosa del controlador PID en el proyecto, proporcionando una base sólida para futuras aplicaciones y mejoras en el ámbito del control automático.

Durante la prueba realizada, se produjo de manera imprevista y no programada la entrada de una cantidad específica de líquido al sistema, lo que resultó en una ocupación de 5 cm en el estanque. Esta incidencia se refleja claramente en la gráfica presentada en la Figura 3-7, donde, de manera abrupta, en un lapso aproximado a 5 minutos, se logró gestionar y controlar eficazmente la situación, restableciendo la estabilidad del sistema. La capacidad del sistema para manejar de forma rápida y precisa este evento no planificado destaca la eficacia de la implementación del controlador. Este éxito en la respuesta ante perturbaciones imprevistas subraya la robustez del sistema y su habilidad para recuperar la estabilidad operativa de manera eficiente, reforzando así la efectividad del controlador en escenarios dinámicos y desafiantes.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-7 - Aplicación de una perturbación en estanque de acumulación

3.2.2 Análisis de la respuesta del sistema

La transición de un control manual u otro tipo de control, a la implementación de un controlador PID en el sistema siempre implica una mejora sustancial en la eficacia y estabilidad

operativa. Antes de la introducción del controlador PID, el sistema, regulado de forma manual, se enfrentaba a limitaciones intrínsecas al control manual, como la dificultad para ajustarse rápidamente a cambios en las condiciones del proceso y la presencia de oscilaciones indeseadas. Este trabajo evidencia cómo la aplicación del controlador PID supera estas limitaciones, destacando la capacidad del controlador para adaptarse dinámicamente a las variaciones del sistema. Las evaluaciones cuantitativas evidencian una mejora significativa en términos de tiempo de respuesta y reducción de errores, indicando una mayor precisión en la regulación del proceso. Además, se exploran las capacidades del sistema frente a perturbaciones, resaltando la habilidad del controlador PID para minimizar fluctuaciones indeseadas y mantener la estabilidad en condiciones cambiantes. Este cambio de enfoque hacia el controlador PID se revela esencial para optimizar la eficiencia del sistema y garantizar un rendimiento operativo constante y preciso, sobre todo al considerar que el ajuste manual de la válvula proporcional para un ajuste preciso del nivel no resulta viable en el proceso.

Si bien, el controlador, permitió realizar los ajustes dentro de los rangos admisibles, también es correcto advertir de los valores a prever y cuidar a futuro. Para el presente caso, cabe mencionar que el parámetro a considerar con mayor riesgo en el sistema fue el del parámetro derivativo, el cual se define con un valor más elevado que lo que se acostumbra, a modo de compensar parámetros predichos en la planificación del proyecto, como lo fueron las características técnicas de la válvula proporcional de flujo, la cual con su banda muerta proporcionaría bajo control.

En el dinámico panorama actual, la incorporación y utilización de las nuevas herramientas que surgen a diario no solo resultan atractivas, sino que también se revelan como opciones sumamente cómodas que no solo mejoran, sino que transforman la calidad del servicio de control. Estas herramientas no solo facilitan las operaciones diarias, sino que añaden un valor significativo que amplía las posibilidades y horizontes en la industria. Al implementar estas tecnologías, no solo mejoramos la eficiencia operativa, sino que también se expanden las capacidades del proyecto al permitir el control remoto y la gestión de información en tiempo real y a distancia.

La capacidad de realizar ajustes y monitorear procesos de forma remota abre un abanico de oportunidades. La posibilidad de realizar controles a distancia no solo optimiza la eficiencia, sino que también permite una respuesta inmediata ante cambios en el entorno. La gestión de información en tiempo real se convierte en un pilar fundamental, permitiendo tomar decisiones fundamentadas basadas en datos precisos y actualizados. Este enfoque innovador genera instancias que podrían dar lugar a opciones de reportabilidad instantánea y expresa, una característica esencial en la era actual.

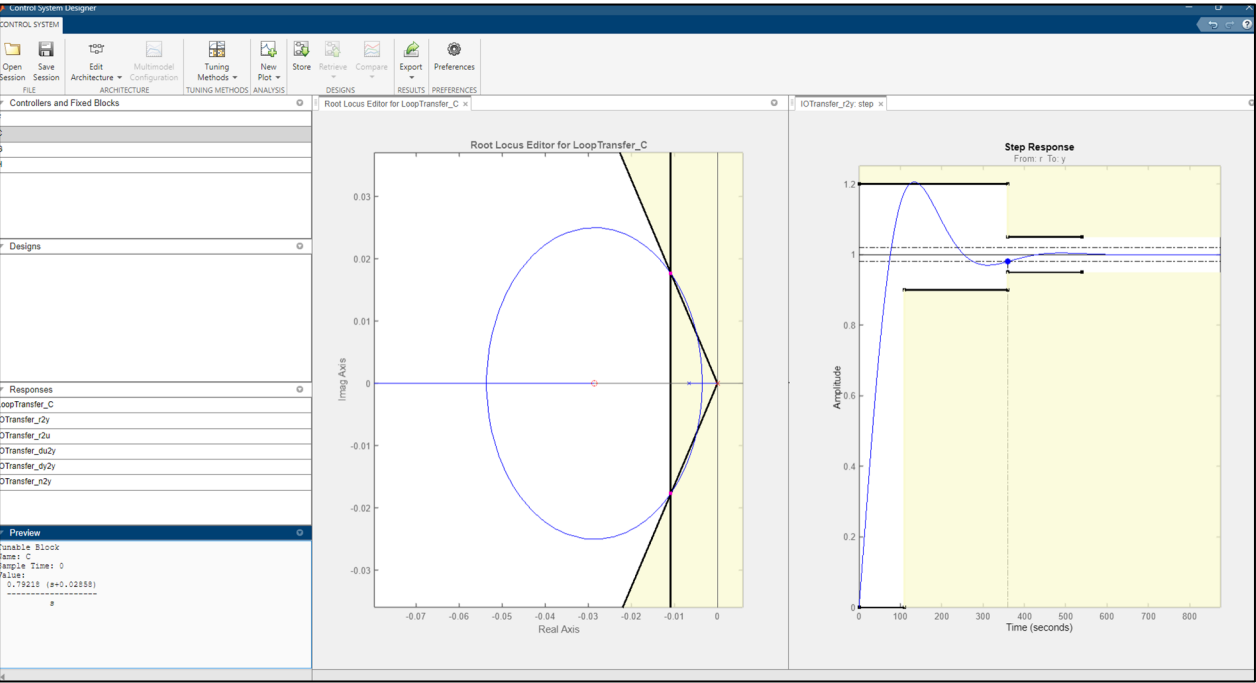
En este contexto, la disponibilidad de información precisa y actualizada se vuelve crucial. La capacidad de mantener los datos al alcance de manera precisa se convierte en una ventaja

competitiva, asegurando que la toma de decisiones esté respaldada por información fidedigna. En última instancia, la integración de estas herramientas no solo mejora la eficiencia operativa, sino que redefine la forma en que abordamos los desafíos y aprovechamos las oportunidades en la industria, ofreciendo un enfoque proactivo y adaptativo que es esencial en el entorno empresarial actual.

3.2.3 Controlador con compensación de conmutación

A continuación, para demostrar alerta anteriormente predicha, se continuará con la mejora de la condición del tiempo de respuesta de la componente derivativa, por lo que se realizará otro controlador, PI, el cual, se volverá a evaluar su eficiencia y su comportamiento.

Para el presente caso, se realizará el diseño y dimensionamiento con la herramienta Control System Desingn, el cual utilizando el lugar geométrico de raíces daremos los siguientes requerimientos de diseños, 6 minutos de asentamiento y 20% de overshoot (Figura 3-8).



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-8 - Diseño con Control system desingn

En el presente diseño, considerando un controlador PI con un polo en su origen, de modo integrador, más un cero, se procede con los requerimientos anteriormente mencionado, a ajustar

los parámetros dentro de los rangos, entregando un valor de PI en Matlab tan como en la Figura 3-9.

```
ans =  
  
      1  
Kp + Ki * ---  
      s  
  
with Kp = 0.792, Ki = 0.0226  
  
Name: C  
Continuous-time PI controller in parallel form.  
Model Properties  
fx >> |
```

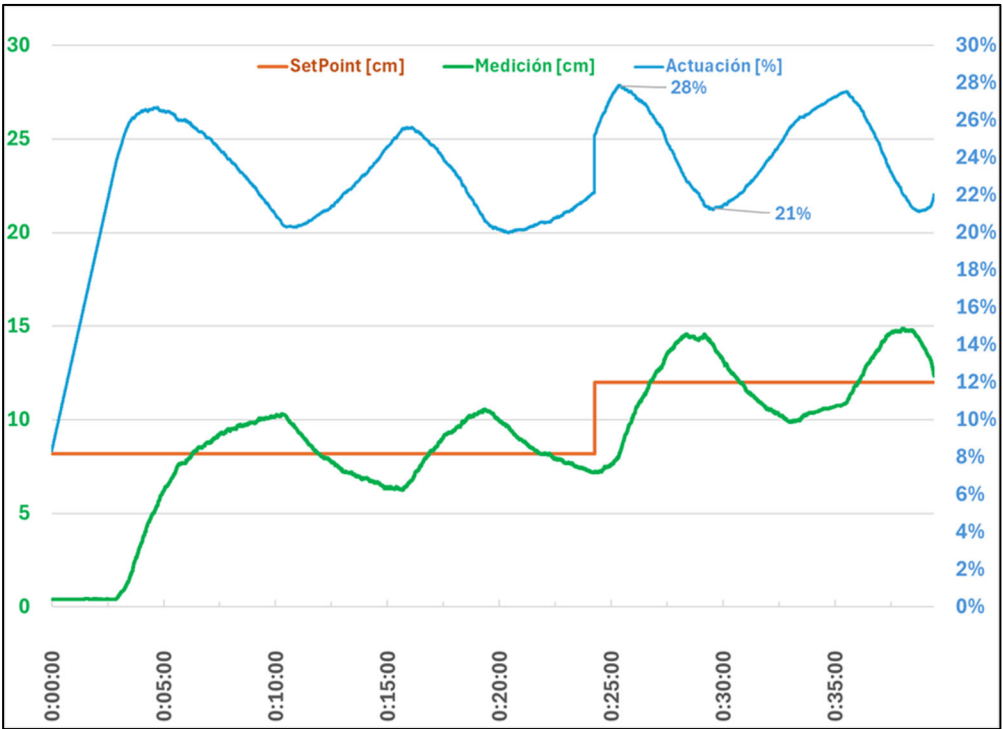
Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-9 – Cálculo controlador PID con Matlab

Aplicando el procedimiento anteriormente utilizado en la sección 3.1, se utiliza la ecuación de conversión de PID paralelo a PID no interactivo, quedando la ecuación tal que:

$$Tn \text{ ó } Tr = \frac{Kp}{Ki} = \frac{0.79}{0.023} = 34.4$$

Quedando como resultado la siguiente respuesta de la planta (Figura 3-10), dejando al descubierto la falencia prevista en un inicio, que la característica de la válvula proporcional, si bien tiene características adecuadas para sintonización y modulación, no es lo suficientemente apta, para la utilización para un control de flujo de precisión, por las características intrínsecas de sus bandas muertas de control, la cual es de aproximadamente el 3% de reacciones, provocando cambios demasiados tardíos en el control de la planta.



Fuente: Elaboración de propia autoría

Figura 3-10 - Respuesta de la planta con controlador PI

3.3 CONSIDERACIONES PARA MEJORAR

Después de la elaboración del controlador PID diseñado, se han identificado diversas oportunidades para introducir mejoras que incidan positivamente en su rendimiento y eficacia operativa. En primer lugar, consolidar la monitorización y control de forma remota, que no solo sea la visualización, sino que también el control. Alternativa viable mediante la plataforma Ubidots y Node-Red, necesariamente instalada de raíz en el PLC. Adicionalmente, se sugiere llevar a cabo un análisis exhaustivo de los parámetros del controlador, con un enfoque especial en las constantes proporcional, integral y derivativa. Un ajuste minucioso de estas variables permitirá una optimización más precisa de la respuesta del sistema ante cambios dinámicos, o en su defecto, buscar actuadores mas idóneos para la representación que anteriormente se quiso dar.

3.3.1 Instalación de Node-Red en raíz de PLC

Para llevar a cabo la instalación de Node-Red, es primordial evaluar la necesidad de incrementar la capacidad de memoria interna del PLC, dado que este dispositivo posee una

capacidad limitada. Para lograr esto, se procederá con la instalación de una memoria SD (Figura 3-711) de la misma marca que el PLC, asegurándose de mantener los protocolos de seguridad y comunicación intactos.



Fuente: <https://cl.wiautomation.com/phoenix-contact/productos-generales/2701872>

Figura 3-11 - Imagen referencial de tarjeta de memoria necesaria para PLCNext

Luego, utilizando la aplicación PuTTY y clave de super usuario, se debe ingresar las siguientes líneas de comandos:

- export PATH=\$PATH:/opt/bin:/opt/sbin
- echo \$PATH
- npm install pm2
- /opt/plcnext/node_modules/.bin/pm2 start /opt/plcnext/node_modules/.bin/node-red -
- -v
- /opt/plcnext/node_modules/.bin/pm2 save
- /opt/plcnext/node_modules/.bin/pm2 startup

El procedimiento actual no pudo llevarse a cabo debido a la ausencia de una tarjeta de memoria SD en los equipos analizados desde su origen. Esta carencia impidió la ejecución del montaje y la subsiguiente integración de los sistemas mencionados anteriormente.

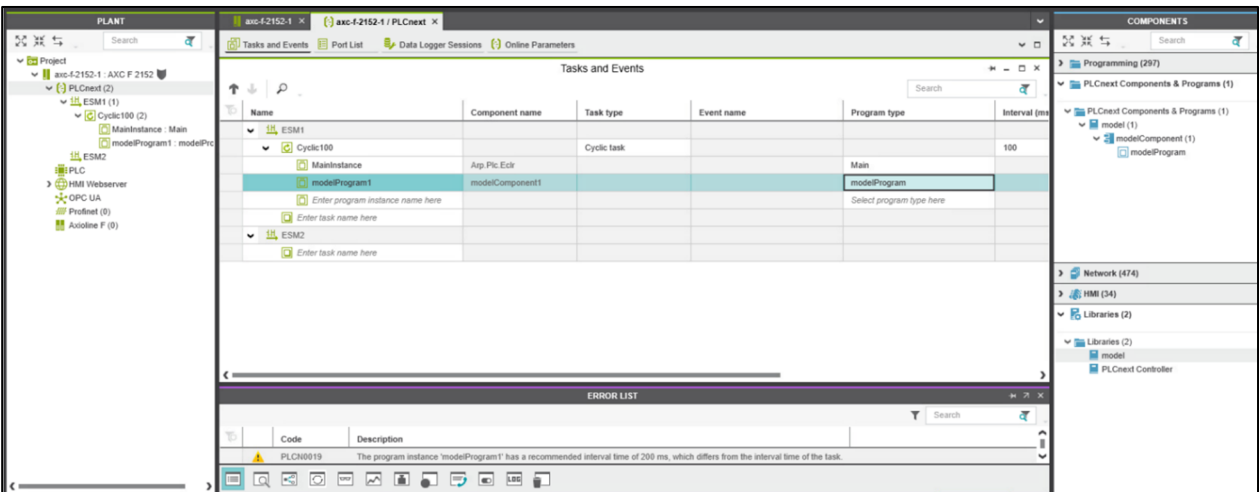
3.3.2 Visualización de los datos en monitor remoto

Dentro del entorno del Dashboard de Ubidots, se fija una representación visual en tiempo real del nivel de agua del sistema a través del sensor de nivel, tal como se mostró en la

figura 3-4. Este instrumento gráfico pretende brindar al usuario una percepción instantánea y detallada de los niveles de altura en la unidad de medida de cm, con figuras de barras, que no solo proporciona una representación visual clara y fácil de interpretar, sino que también ofrece un monitoreo continuo y en tiempo real de los cambios dinámicos en el nivel de agua del sistema. Este enfoque no solo mejora la experiencia del usuario al facilitar la comprensión de la información, sino que también brinda una herramienta efectiva para la toma de decisiones inmediatas y ajustes precisos en función de los datos actualizados y presentados de manera accesible en el Dashboard.

La concordancia entre los resultados al contrastar el nivel real, medido por el sensor instalado en la planta de multivariables, y la información visualizada en el Dashboard de Ubidots mediante el PLCNextControl durante la operación de alimentación de la bomba SPX CM30 tienen que ser fiables y en concordancia con los datos obtenidos. Revelando una correspondencia precisa entre la lectura del sensor en la planta y la representación gráfica en tiempo real proporcionada por la plataforma Ubidots a través del sistema de control PLCNextControl validando así la precisión y la sincronización entre las mediciones en el campo y la presentación en el Dashboard. Este nivel de coherencia es esencial para asegurar la integridad y confiabilidad de los datos operativos, respaldando de manera efectiva las decisiones basadas en la información proporcionada por el sistema.

Adicionalmente, se propone explorar la integración de técnicas avanzadas de sintonización PID automática, como las disponibles en Simulink. En esta alternativa, la herramienta realiza el control directo hacia el PLC, generando la programación directamente desde el modelo matemático, según se describe en el manual de Phoenix Contact titulado “Software add-on for the integration and execution of MATLAB® Simulink® models on Remote Field Controllers and Axioline F Controllers.” (Figura 3-12).



Fuente: Manual “Software add-on for the integration and execution of MATLAB® Simulink® models on Remote Field Controllers and Axioline F Controllers.”, descargado de la pagina official de Phoenix Contact

Figura 3-12 - Habilidad de Matlab en PLCNext Engineer

Siguiendo con las posibilidades que ofrece la inclusión de complementos adicionales proporcionados por Simulink, la utilización de recursos como el control automático PID y/o un mecanismo de anti-windup se presenta como una mejora valiosa para prevenir saturaciones en el actuador. Esta medida no solo incrementará la estabilidad del sistema en condiciones extremas, sino que también garantizará un control más efectivo incluso ante perturbaciones o variaciones abruptas en la carga del proceso. La capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros del PID a las variaciones en las condiciones operativas asegurará una respuesta más ágil y ajustada a las necesidades específicas del sistema. Este enfoque dinámico no solo mejorará la capacidad de control en tiempo real, sino que también facilitará la adaptación a cambios imprevistos en el entorno.

Además, se aconseja implementar un sistema de filtrado doble para mitigar posibles efectos de ruido en las señales de retroalimentación, adaptándose a las condiciones del proyecto. Este componente adicional contribuirá a una lectura más precisa de las condiciones del sistema, reduciendo la posibilidad de errores o fluctuaciones indeseadas en el control. Estas recomendaciones, una vez implementadas, tienen como objetivo elevar la robustez y precisión del controlador PID, asegurando un rendimiento óptimo y adaptable a las variadas condiciones operativas que puedan surgir en el entorno industrial.

3.3.3 Mejoras en válvula proporcional

Tal como indica en el blog de *“opticontrols”*, haciendo referencia al libro *“Control de procesos para profesionales”* de Jacques Smuts, se cita, *“Una válvula de control con banda muerta provocará oscilaciones en un bucle de nivel bajo control PI o PID si el controlador acciona directamente la válvula de control (no en cascada). Una válvula de control con banda muerta también puede provocar oscilaciones después de un cambio de punto de ajuste en bucles de control en procesos autorregulados, especialmente si la acción integral del controlador es un poco excesiva”*, la siguiente cita, hace referencia al problema descrito en la aplicación del controlador PI con compensación de conmutación, el cuál fue diseñado para hacer frente al problema anteriormente descubierto, como lo fue el excesivo valor del parámetro derivativo, lo que desencadenó en una excesiva respuesta ante oscilaciones o ruido, supliendo la problemática de las bandas muertas, por exigir al actuador sobrepasar el umbral de ruptura que pudiese presentar la válvula proporcional, ya sea por condiciones de fricción, sobre impulso del posicionador, sobre dimensionamiento de la válvula o inclusive las características naturales de no linealidad del flujo.

Un punto para considerar como mejoras a futuro es siempre que se pueda, optar por equipamiento adecuado para las características propias del problema a solucionar, en este caso, lo mas adecuado puede ser un actuador con una banda muerta inferior al 1% tal como sugiere *“Emerson”* en su manual *“CONTROL VALVE HANDBOOK”*, *“Una válvula bien diseñada debe*

responder a señales del 1 % o menos para proporcionar una reducción efectiva en la variabilidad del proceso. Sin embargo, no es raro que algunas válvulas presenten una banda muerta de hasta el 5 % o más.”

Tal vez, para otros casos fuese más factible la implementación de mecanismos más clásicos, la presente aplicación se puede considerar para solucionar casos particulares, donde la implementación de otros equipamientos mas costosos no son posible a corto plazo, y se buscan soluciones que cumplan con el objetivo de sanear problemáticas en un plazo acotado, con bajos recursos, como lo son en gran parte de la industria, en donde la aplicación de variadores de frecuencia para la variación del flujo no es posible por motivos variados, como lo son las condiciones preexistentes del caso, por ejemplo, las plantas que no cuentan con motores con las características técnicas para soportar la implementación de estos inversores, o por no tener las características materiales para almacenarlo, por motivos inflamatorios u otros casos de seguridad que se pueden dar, como en el caso de la industria química.

CONCLUSIONES

Este trabajo de título se enfocó en alcanzar dos objetivos principales. En primer lugar, se propuso lograr la implementación de una acción de control mediante la estrategia de control PID, emulando un sistema que requiera el uso de variador de flujo, con limitaciones físicas. Como segundo objetivo, se planteó el monitoreo y control a través de Internet de las variables físicas de nivel en los subsistemas de los bancos de multivariantes de la universidad.

Para lograr estos propósitos, se llevó a cabo la configuración del hardware y el diseño del software utilizando diversas herramientas de ingeniería, como PLCNext Engineer, Node-Red y la visualización y control de los datos en red a través de Ubidots. Además, se creó un Dashboard que brinda al usuario u operador una interfaz amigable y sencilla para el monitoreo de las variables.

A pesar de no haber logrado alcanzar la totalidad de los objetivos inicialmente propuestos, es crucial destacar que se ha dedicado un esfuerzo significativo para realizar un análisis detallado y abordar las tareas pendientes. Estas tareas, entendidas como elementos necesarios para facilitar el monitoreo y control a distancia, han sido objeto de atención y resolución. Aunque ciertos objetivos pueden haber quedado pendientes, el enfoque estratégico a futuros abordajes, se dejan planteados para posibles realizaciones.

Adicionalmente, el proyecto se ha orientado hacia la eficiencia y la excelencia en la atención de las necesidades planteadas. La meta al concluir esta iniciativa es presentar una propuesta que no solo satisfaga de manera efectiva dichas necesidades, sino que también integre mejoras significativas para el beneficio integral de la comunidad universitaria. Este enfoque va más allá de la solución inmediata, buscando generar un impacto positivo y sostenible en el entorno académico. En este sentido, se persigue no solo resolver desafíos puntuales, sino también crear oportunidades que fomenten una mayor sinergia con el entorno industrial. Este planteamiento, respaldado por altos estándares de calidad, busca establecer vínculos más sólidos y duraderos entre la institución académica y el sector industrial, promoviendo así una colaboración mutuamente beneficiosa.

BIBLIOGRAFÍA

PHOENIX CONTACT. AXC F 2152 - Controller. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/controller-axc-f-2152-2404267>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. PLCNEXT ENGINEER - Programming software. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/software-plcnext-engineer-1046008>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. IB IL AO 4/I/4-20-ECO - Módulo analógico. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/componente-de-es-ib-il-ao-4i4-20-eco-2702497>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. IB IL AI 4/I/4-20-ECO - Módulo analógico. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/componente-de-es-ib-il-ai-4i4-20-eco-2702495>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. IB IL 24 DO8/HD-PAC - Módulo digital. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/componente-de-es-ib-il-24-do8hd-pac-2700172>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. IB IL 24 DI 4-ME - Módulo digital. [En Línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/componente-de-es-ib-il-24-di-4-me-2863928>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT. Function Block Library PLCNE_AutoTunePID For PLCnext Engineer. [En Línea]. <<https://www.plcnextstore.com/world/app/1949>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT ARGENTINA. PLCnext Engineer. [En Línea]. <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLvB-xlcsa-YnMM0Yg2z5jDB-xhEr4hQJj>>. [Visitado: Diciembre 2023].

PHOENIX CONTACT ARGENTINA. Seminarios Tecnología PLCnext. [En Línea].
 <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLvB-xlcsa-Ynnc-dHCAy8Zfvl9skho-3V>>. [Visitado: Diciembre 2023].

RealPars. PLC Programming Tutorials for Beginners. [En Línea].
 <https://youtube.com/playlist?list=PLln3BHg93SQ_Htr3cK5xQT_uL82tumfML&si=jic_5oCUBqslGHWe>. [Visitado: Diciembre 2023].

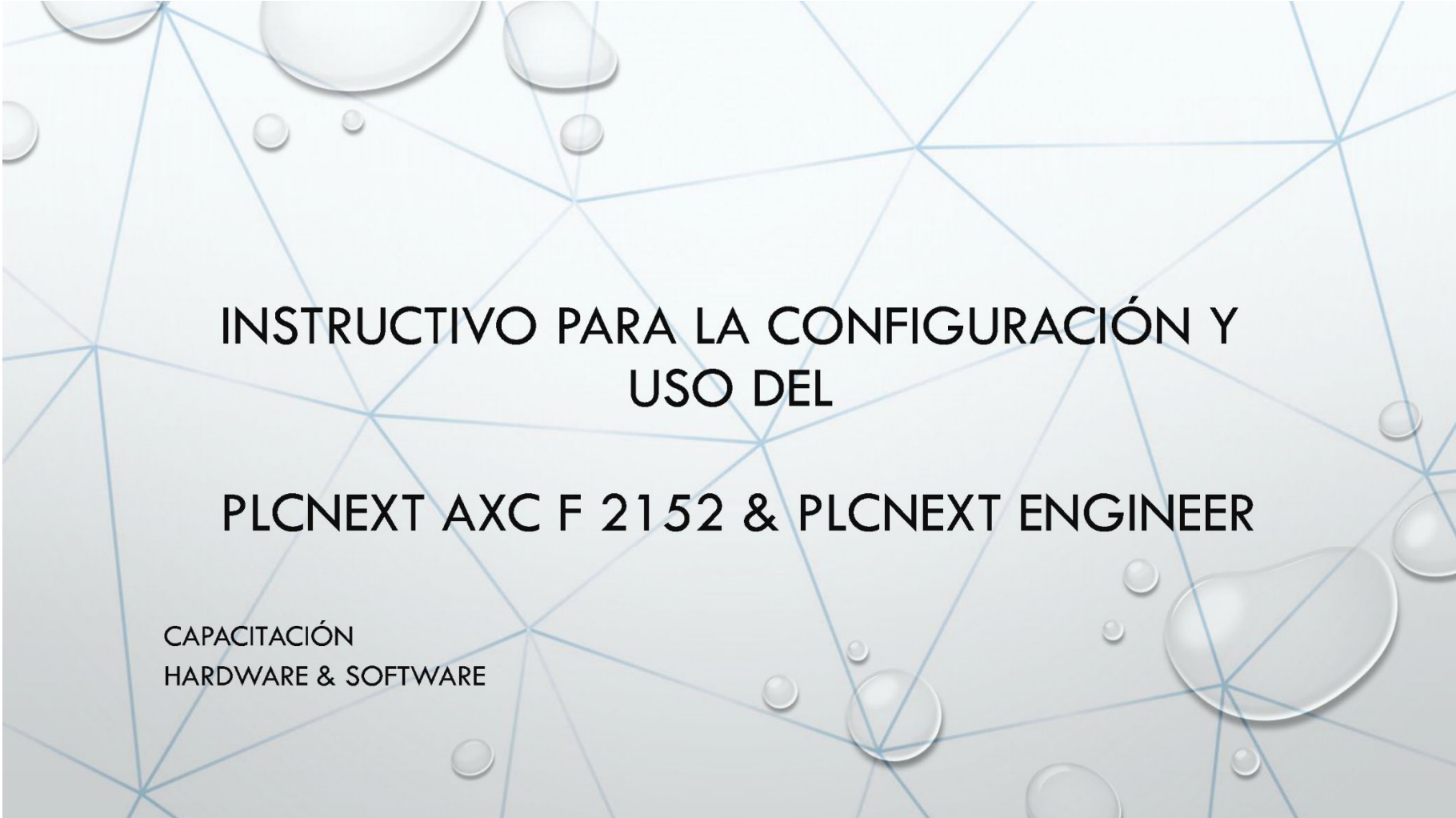
Control Valve Problems. [En Línea].
 <[https://blog.opticontrols.com/archives/77#:~:text=The%20ISA%20clearly%20calls%20the,valve%20\(non%2Dcascade\).>](https://blog.opticontrols.com/archives/77#:~:text=The%20ISA%20clearly%20calls%20the,valve%20(non%2Dcascade).>)>. [Visitado: Agosto 2024].

Flow Control with VFD Pumps versus Control Valves. [En Línea].
 <<https://www.emersonautomationexperts.com/2011/valves-actuators-regulators/flow-control-with-vfd-pumps-versus-control-valves/>>. [Visitado: Agosto 2024].

CONTROL VALVE HANDBOOK. [En Línea].
 <<https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>>. [Visitado: Agosto 2024].

ANEXOS

1 - INSTRUCTIVO PARA LA CONFIGURACIÓN Y USO DEL PLCNEXT AXC F 2152 & PLCNEXT ENGINEER



INSTRUCTIVO PARA LA CONFIGURACIÓN Y USO DEL PLCNEXT AXC F 2152 & PLCNEXT ENGINEER

CAPACITACIÓN
HARDWARE & SOFTWARE

PLCNEXT AXC F 2152 & PLCNEXT ENGINEER

EN ESTE INSTRUCTIVO, SE ENSEÑARÁ A IMPLEMENTAR Y CONFIGURAR NUESTRO EQUIPO PLC PARA PODER DESARROLLAR POSTERIORMENTE UN CONTROLADOR DE NIVEL UTILIZANDO UN CONTROLADOR PID EN UN PLC AXC F 2152.

ESTE CURSO PROPORCIONARÁ LAS HABILIDADES NECESARIAS PARA IMPLEMENTAR UN CONTROL DE NIVEL EFICAZ EN ENTORNOS INDUSTRIALES UTILIZANDO HERRAMIENTAS MODERNAS Y VERSÁTILES.

HARDWARE

EN EL PRESENTE ENTORNO SE TRABAJARÁ
CON LOS SIGUIENTES EQUIPOS:

- ✓ PLCNEXT MOD. AXC F 2152
- ✓ AXC F IL ADAPT
- ✓ IB IL AO 4/I/4-20-ECO
- ✓ IB IL AI 4/I/4-20-ECO
- ✓ IB IL 24 DO8/HD-PAC
- ✓ IB IL 24 DI 4-ME



PARA CONECTAR TODOS ESTOS EQUIPOS, SIGUE LOS PASOS INDICADOS A CONTINUACIÓN:

1. PLCNEXT MOD. AXCF 2152: ES EL CONTROLADOR PRINCIPAL AL QUE SE CONECTARÁN TODOS LOS MÓDULOS ADICIONALES DE FORMA SERIAL A SU DERECHA.
2. AXCF IL ADAPT: ESTE ADAPTADOR SE CONECTA DIRECTAMENTE AL PLCNEXT AXCF 2152. PROPORCIONA LA INTERFAZ NECESARIA PARA CONECTAR LOS MÓDULOS DE LA SERIE INLINE.
3. IB IL AO 4/1/4-20-ECO (MÓDULO DE SALIDA ANALÓGICA):
 1. CONECTA ESTE MÓDULO AL ADAPTADOR AXCF IL ADAPT.
 2. ESTE MÓDULO PROPORCIONA 4 SALIDAS DE CORRIENTE DE 4-20 MA.
4. IB IL AI 4/1/4-20-ECO (MÓDULO DE ENTRADA ANALÓGICA):
 1. CONECTA ESTE MÓDULO DESPUÉS DEL MÓDULO DE SALIDA ANALÓGICA.
 2. ESTE MÓDULO PROPORCIONA 4 ENTRADAS DE CORRIENTE DE 4-20 MA.
5. IB IL 24 DO8/HD-PAC (MÓDULO DE SALIDA DIGITAL):
 1. CONECTA ESTE MÓDULO DESPUÉS DEL MÓDULO DE ENTRADA ANALÓGICA.
 2. ESTE MÓDULO PROPORCIONA 8 SALIDAS DIGITALES.
6. IB IL 24 DI 4-ME (MÓDULO DE ENTRADA DIGITAL):
 1. CONECTA ESTE MÓDULO DESPUÉS DEL MÓDULO DE SALIDA DIGITAL.
 2. ESTE MÓDULO PROPORCIONA 4 ENTRADAS DIGITALES.

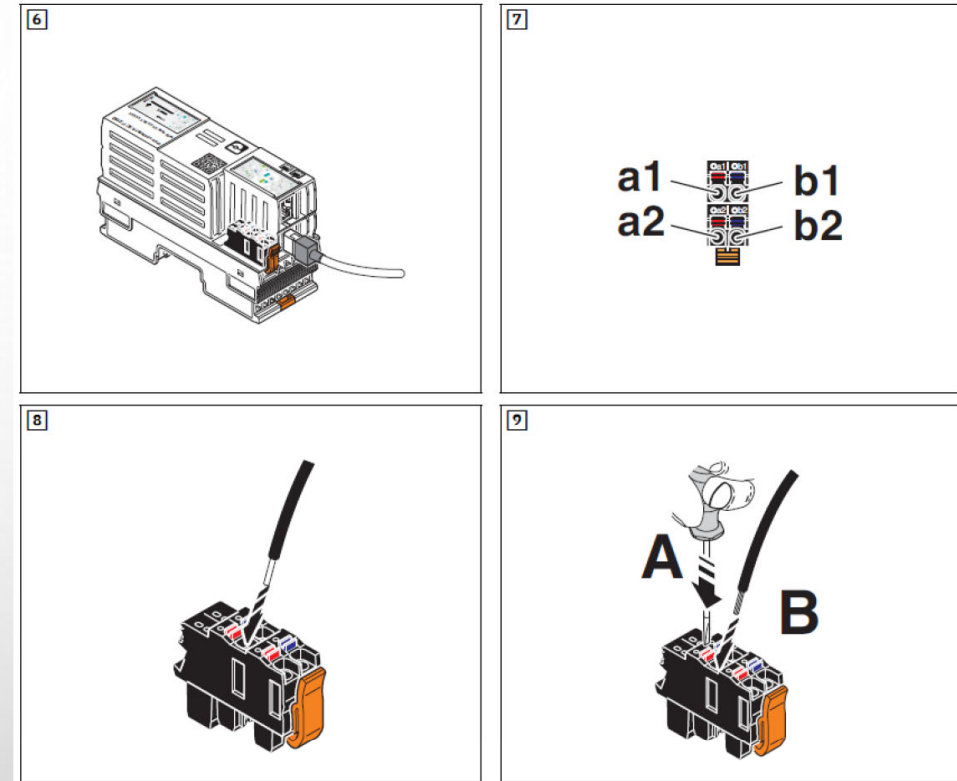


CONECTA LAS SEÑALES DE SALIDA Y ENTRADA ANALÓGICAS Y DIGITALES A LOS DISPOSITIVOS DE CAMPO CORRESPONDIENTES, Y ASEGÚRATE DE ALIMENTAR CADA MÓDULO CORRECTAMENTE SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE.

PUNTOS DE CONEXIÓN DEL PLC AXC F 2152

PARA ALIMENTAR EL PLC AXC F 2152, CONECTA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 24 V DC A LOS TERMINALES DE ENTRADA DE ALIMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO. CONECTA LOS TERMINALES A1 Y A2 AL POSITIVO (+) DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y EL TERMINAL B1 Y B2 AL NEGATIVO (-).

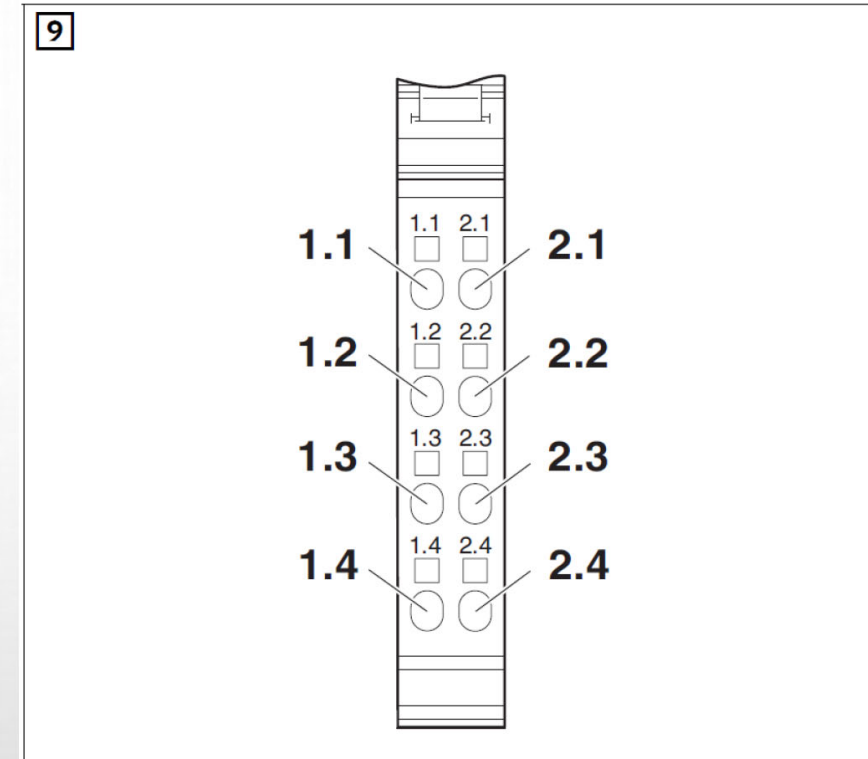
PARA CONECTAR EL CONECTOR ETHERNET EN EL PLC AXC F 2152, UTILIZA UN CABLE ETHERNET (CAT 5E O SUPERIOR) CON CONECTORES RJ45. INSERTA UN EXTREMO DEL CABLE EN UNO DE LOS PUERTOS ETHERNET DEL PLC Y EL OTRO EXTREMO EN TU RED LOCAL (COMO UN SWITCH, ROUTER O COMPUTADORA). VERIFICA QUE LAS LUCES LED JUNTO AL PUERTO ETHERNET EN EL PLC SE ENCIENDAN, INDICANDO UNA CONEXIÓN ACTIVA. LUEGO, CONFIGURA LOS PARÁMETROS DE RED NECESARIOS, COMO LA DIRECCIÓN IP, MÁSCARA DE SUBRED, PUERTA DE ENLACE Y SERVIDORES DNS, UTILIZANDO EL SOFTWARE PLCNEXT ENGINEER O ACCEDIENDO A LA INTERFAZ WEB DEL PLC, TAL COMO SE INDICARÁ MÁS ADELANTE EN LA CAPACITACIÓN DEL SOFTWARE.



PUNTOS DE CONEXIÓN DEL MÓDULO AXC F IL ADAPT

PARA ALIMENTAR EL MÓDULO AXC F IL ADAPT, CONECTA UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 24 V DC A SUS TERMINALES DE ENTRADA DE ALIMENTACIÓN. CONECTA EL TERMINAL 1.1, 1.2, 2.1 Y 2.2 AL POSITIVO (+) DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y EL TERMINAL 1.3 Y 2.3 AL NEGATIVO (-).

ESTA ALIMENTACIÓN ES NECESARIA PARA PROPORCIONAR ENERGÍA TANTO AL MÓDULO AXC F IL ADAPT COMO A LOS MÓDULOS INLINE CONECTADOS EN LA SERIE. ASEGÚRATE DE QUE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PUEDA SUMINISTRAR LA CORRIENTE REQUERIDA PARA TODOS LOS MÓDULOS CONECTADOS EN SERIE, SIGUIENDO LAS ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE PARA GARANTIZAR UN FUNCIONAMIENTO SEGURO Y EFICAZ.

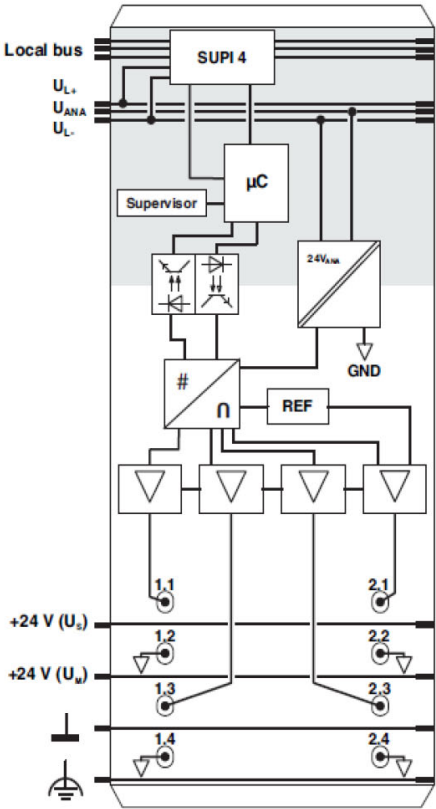


PUNTOS DE CONEXIÓN DEL MÓDULO IB IL AO 4/I/4-20-ECO

PARA CONECTAR LAS SALIDAS ANALÓGICAS DEL MÓDULO IB IL AO 4/I/4-20-ECO, PRIMERO LOCALIZA LOS TERMINALES DE LAS CUATRO SALIDAS EN EL MÓDULO, QUE ESTÁN ETIQUETADAS CON UNA SEÑAL DE SALIDA Y UNA CONEXIÓN COMÚN DE LA SIGUIENTE MANERA.

Salidas	Terminal (+)	Terminal GND (-)
Salida 1	1.1	1.2
Salida 2	2.1	2.2
Salida 3	1.3	1.4
Salida 4	2.3	2.4

CONECTA LOS CABLES DE SALIDA ANALÓGICA DESDE EL MÓDULO A LOS DISPOSITIVOS DE DESTINO, ASEGURÁNDOTE DE CONECTAR EL CABLE DE SEÑAL AL TERMINAL CORRESPONDIENTE Y EL CABLE DE REFERENCIA AL TERMINAL COMÚN. LUEGO, ACCEDE AL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN DEL PLC AXIOLINE PARA AJUSTAR LAS SALIDAS ANALÓGICAS SEGÚN LOS PARÁMETROS DE TU APLICACIÓN, ASIGNANDO CORRECTAMENTE CADA CANAL A LA SALIDA DESEADA.

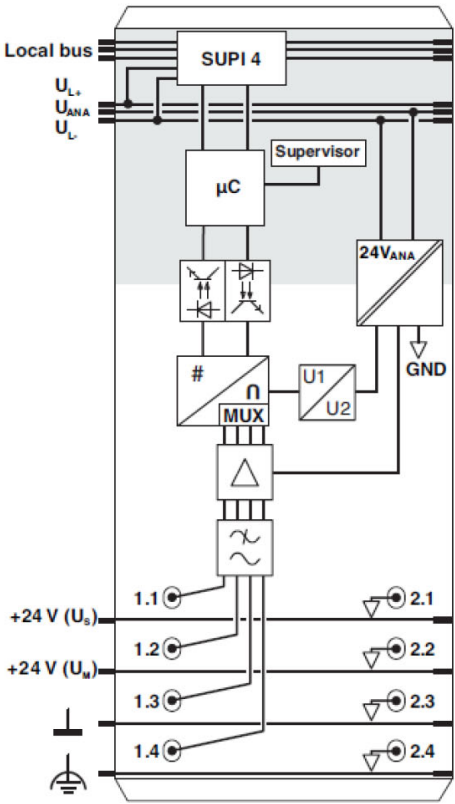


PUNTOS DE CONEXIÓN DEL MÓDULO IB IL AI 4/I/4-20-ECO

PARA CONECTAR LAS SALIDAS ANALÓGICAS DEL MÓDULO IB IL AI 4/I/4-20-ECO, PRIMERO LOCALIZA LOS TERMINALES DE LAS CUATRO ENTRADAS EN EL MÓDULO, QUE ESTÁN ETIQUETADAS CON UNA SEÑAL DE ENTRADA Y UNA CONEXIÓN COMÚN DE LA SIGUIENTE MANERA.

Salidas	Terminal (+)	Terminal GND (-)
Entrada 1	1.1	2.1
Entrada 2	1.2	2.2
Entrada 3	1.3	2.3
Entrada 4	1.4	2.4

CONECTA LOS CABLES DE ENTRADA ANALÓGICA DESDE EL MÓDULO A LOS DISPOSITIVOS DE ORIGEN, ASEGURÁNDOSE DE CONECTAR EL CABLE DE SEÑAL AL TERMINAL CORRESPONDIENTE Y EL CABLE DE REFERENCIA AL TERMINAL COMÚN. LUEGO, ACCEDE AL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN DEL PLC AXIOLINE PARA AJUSTAR LAS SALIDAS ANALÓGICAS SEGÚN LOS PARÁMETROS DE TU APLICACIÓN, ASIGNANDO CORRECTAMENTE CADA CANAL A LA SALIDA DESEADA.

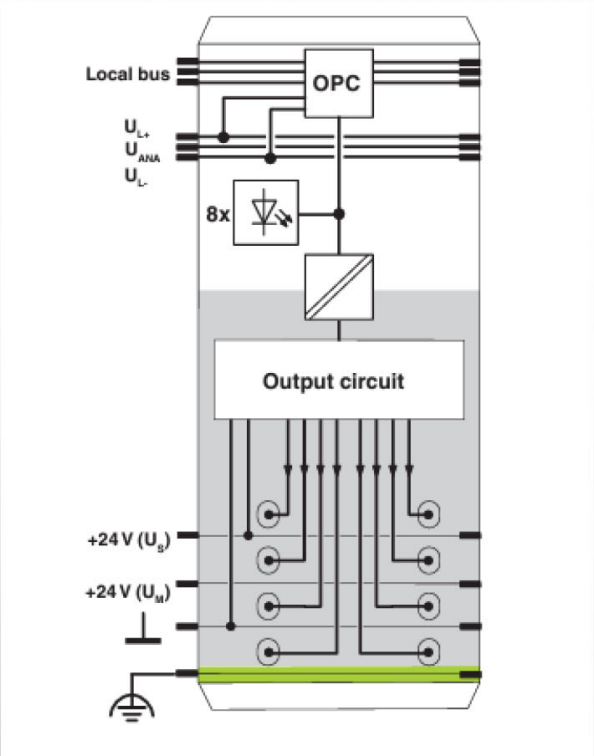


PUNTOS DE CONEXIÓN DEL MÓDULO IB IL 24 DO8/HD-PAC

PARA CONECTAR LAS SALIDAS DIGITALES DEL MÓDULO IB IL 24 DO8/HD-PAC , PRIMERO LOCALIZA LOS TERMINALES DE LAS CUATRO SALIDAS EN EL MÓDULO, QUE ESTÁN ETIQUETADAS CON UNA SEÑAL DE SALIDA Y UNA CONEXIÓN COMÚN DE LA SIGUIENTE MANERA.

Salidas	Terminal (+)	Terminal GND (-)
Salida 1	1.1	2.1
Salida 2	1.2	2.2
Salida 3	1.3	2.3
Salida 4	1.4	2.4

CONECTA LOS CABLES DE SALIDA DIGITALES DESDE EL MÓDULO A LOS DISPOSITIVOS DE DESTINOS, ASEGURÁNDOSE DE CONECTAR EL CABLE DE SEÑAL AL TERMINAL CORRESPONDIENTE Y EL CABLE DE REFERENCIA AL TERMINAL COMÚN. LUEGO, ACCEDER AL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN DEL PLC AXIOLINE PARA AJUSTAR LAS SALIDAS DIGITALES SEGÚN LOS PARÁMETROS DE TU APLICACIÓN, ASIGNANDO CORRECTAMENTE CADA CANAL A LA SALIDA DESEADA.

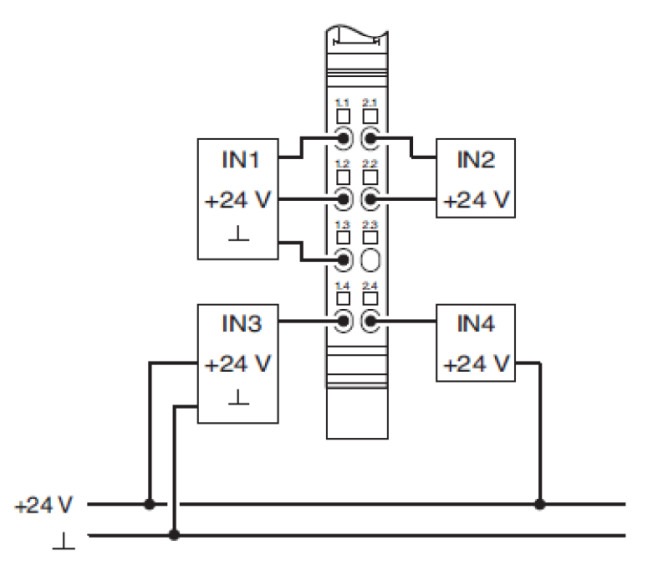


PUNTOS DE CONEXIÓN DEL MÓDULO IB IL 24 DI 4-ME

PARA CONECTAR LAS ENTRADAS DIGITALES DEL MÓDULO IB IL 24 DI 4-ME, PRIMERO LOCALIZA LOS TERMINALES DE LAS CUATRO ENTRADAS EN EL MÓDULO, QUE ESTÁN ETIQUETADAS CON UNA SEÑAL DE ENTRADA Y UNA CONEXIÓN COMÚN DE LA SIGUIENTE MANERA.

Salidas	Terminal (+)	Terminal GND (-)
Entrada 1	1.1	1.3
Entrada 2	2.1	N/A
Entrada 3	1.4	GND
Entrada 4	2.4	GND

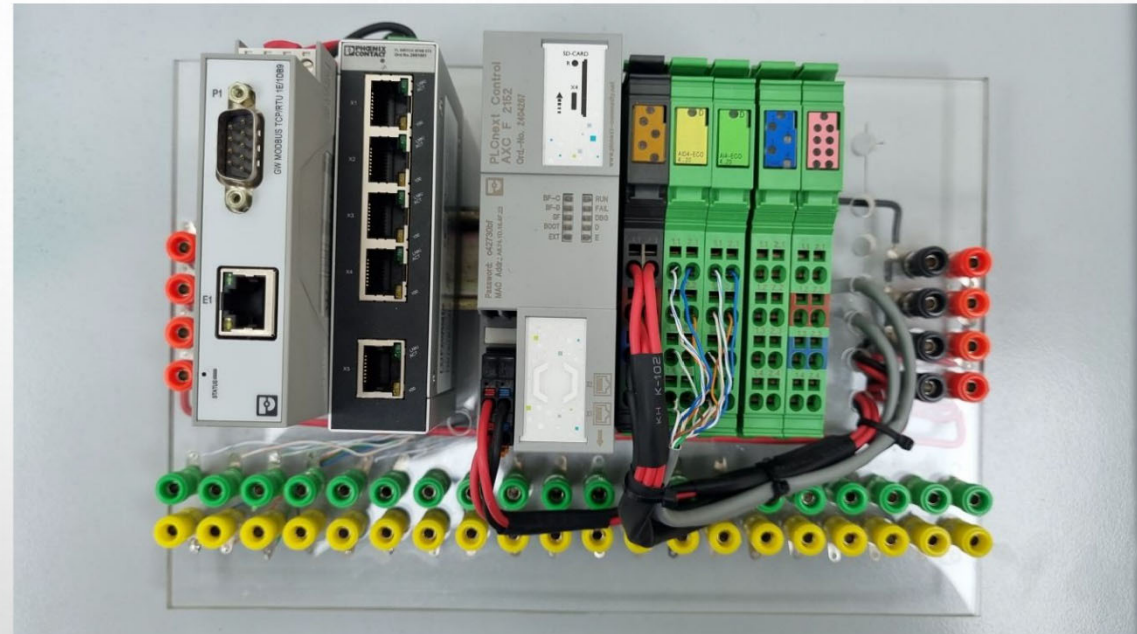
CONECTA LOS CABLES DE ENTRADA DIGITALES DESDE EL MÓDULO A LOS DISPOSITIVOS DE ORIGEN, ASEGURÁNDOSE DE CONECTAR EL CABLE DE SEÑAL AL TERMINAL CORRESPONDIENTE Y EL CABLE DE REFERENCIA AL TERMINAL COMÚN. LUEGO, ACCEDE AL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN DEL PLC AXIOLINE PARA AJUSTAR LAS SALIDAS DIGITALES SEGÚN LOS PARÁMETROS DE TU APLICACIÓN, ASIGNANDO CORRECTAMENTE CADA CANAL A LA SALIDA DESEADA.



SOFTWARE

EN EL PRESENTE TRABAJO SE DESARROLLARÁ
EN EL SIGUIENTE RECURSO INFORMÁTICO:

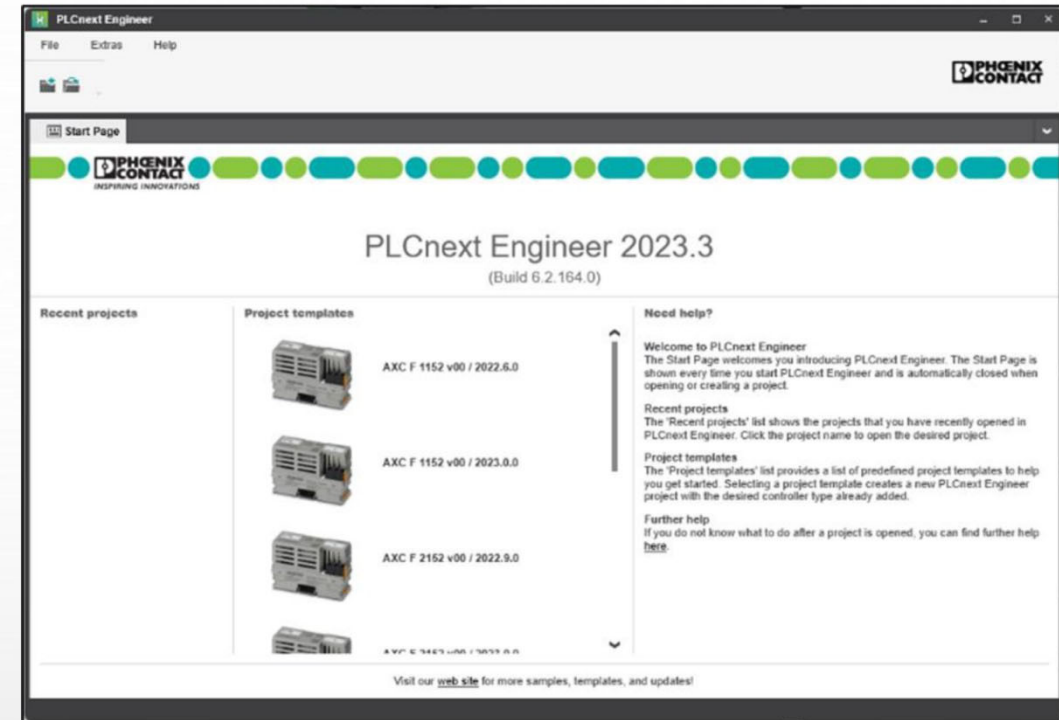
✓ PLCNEXT ENGINEER 2023



PLCNEXT ENGINEER 2023

PLCNEXT ENGINEER ES UNA HERRAMIENTA DE DESARROLLO INTEGRAL DISEÑADA PARA PROGRAMAR Y CONFIGURAR EL PLC AXC F 2152 DE LA SERIE AXIOLINE DE PHOENIX CONTACT. ESTE ENTORNO PERMITE A LOS USUARIOS APROVECHAR LA FLEXIBILIDAD DE LA PLATAFORMA PLCNEXT, COMBINANDO LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN TRADICIONALES (IEC 61131-3) CON LENGUAJES DE ALTO NIVEL COMO C++, C# Y PYTHON.

PLCnext Engineer facilita la creación, simulación y prueba de proyectos de automatización complejos, ofreciendo capacidades avanzadas de conectividad y soporte para la integración de aplicaciones IoT, todo en una interfaz intuitiva que optimiza el flujo de trabajo y mejora la eficiencia del desarrollo.



PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 1.- Como primer paso, corresponde configurar nuestro pc bajo la misma subred que trae por defecto nuestro PLC. Para ello se debe abrir el “Editor de configuración de IP” y establecer los siguientes parámetros.

Editar configuración de IP

Manual

IPv4

Activado

Dirección IP

192.168.1.1

Máscara de subred

255.255.255.0

Puerta de enlace

DNS preferido

DNS a través de HTTPS

Desactivado

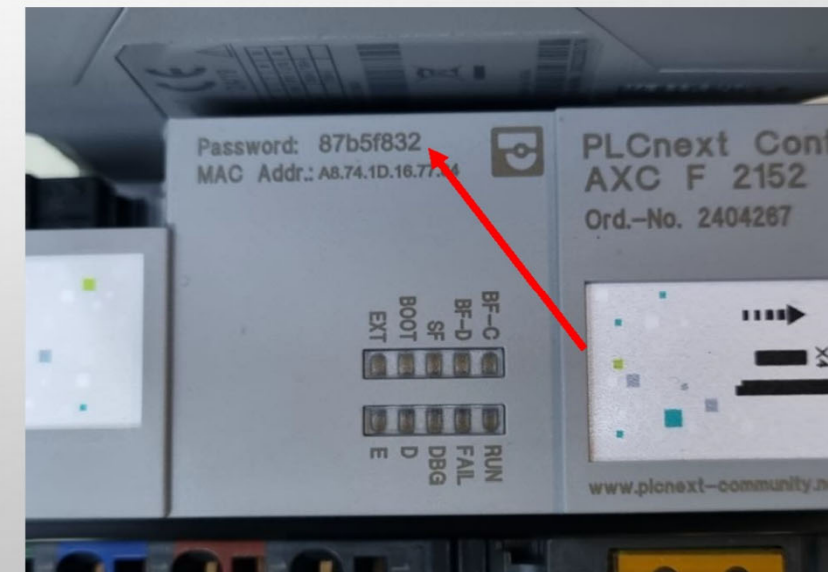
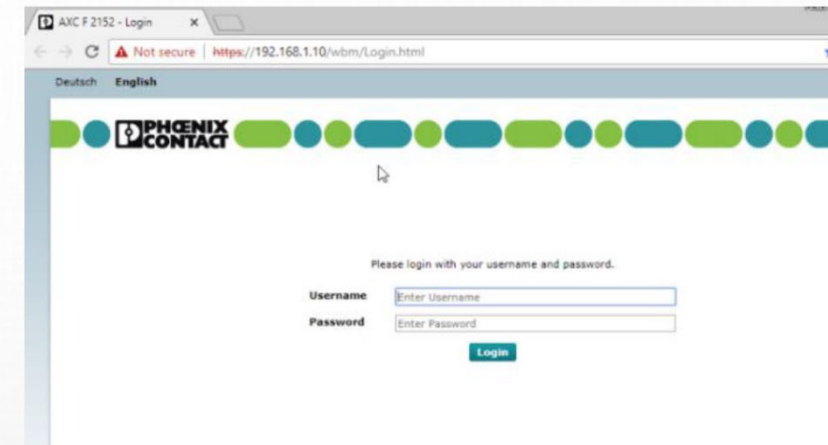
DNS alternativo

Guardar Cancelar

PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 2.- Como segundo paso, corresponde abrir la página web embebida del dispositivo, para eso, se debe, conectar el cable ethernet anteriormente indicado en el curso de Hardware, en cualquiera de los dos slots disponibles del PLC, para luego entrar al navegador favorito del PC e ingresar a la dirección IP “192.168.1.10”.

El Username es “admin” y su Password es la clave inscrita en el frente del PLC:



PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 3.- Ingresar al menú lateral de Network dentro de la configuración, desplegar la pestaña LAN Interface y modificar los valores de:

- IP Address
- Subnet Mask
- Default Gateway

Al terminar el boton “Apply and reboot” y esperar a que el PLC reinicie completamente.

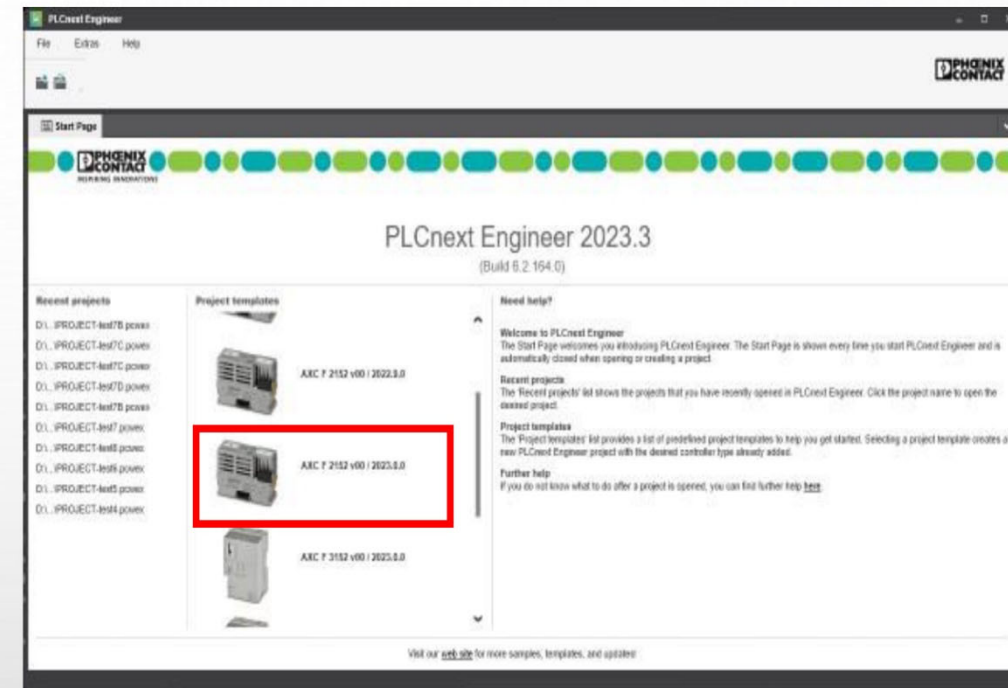
The screenshot shows the 'Configuration' page for a PLC device (AXC F 2152). The 'Network' section is active, displaying the 'LAN Interfaces' configuration. The 'TCP/IP (LAN 1) - Switched Mode' tab is selected. The configuration table shows the following values:

Parameter	Status	Configuration
IP Address	192.168.1.10	192.168.1.10
Subnet Mask	255.255.255.0	255.255.255.0
Default Gateway	192.168.1.254	192.168.1.254
DNS Server Addresses	8.8.8.8	8.8.8.8
	8.8.4.4	8.8.4.4
MAC Address	90-A0-45-A2-BF-DF	
Port X1		
Data Rate		
Duplex Mode		
Link Status	LinkDown	
Port X2		
Data Rate	100 Mbit/s	
Duplex Mode	Full Duplex	
Link Status	LinkUp	

At the bottom right, there are two buttons: 'Discard' and 'Apply and reboot'.

PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

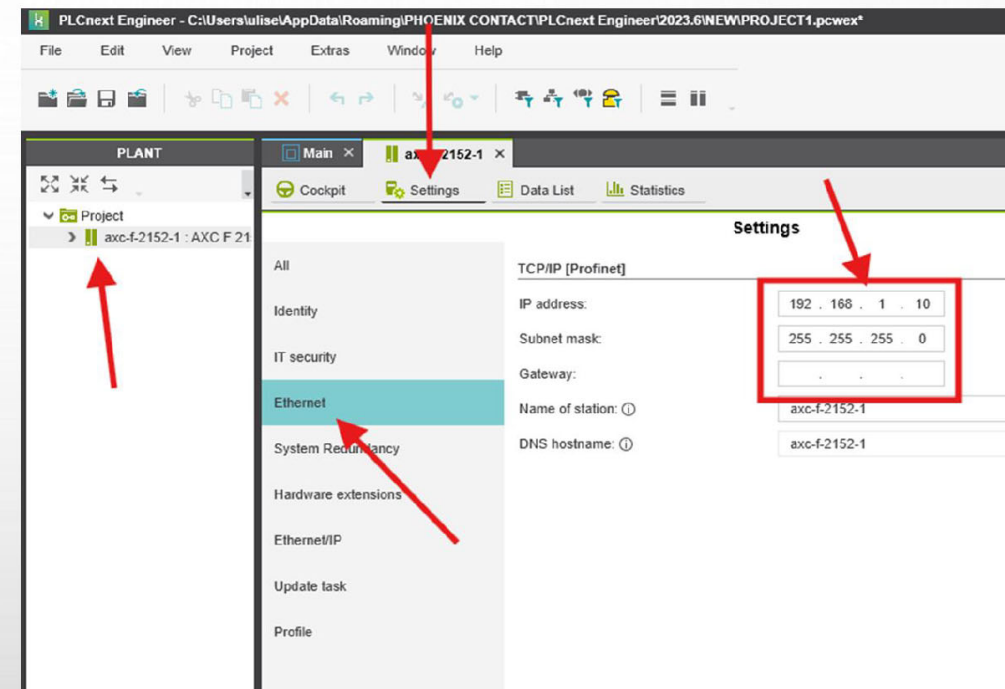
Paso 4.- Como cuarto paso, hacer ingresar al aplicativo del PLC, descargado previamente de forma gratuita desde la página web oficial de Phoenix Contact. Para luego elegir el modelo correspondiente de PLC para tener la plantilla predefinida del equipo.



PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

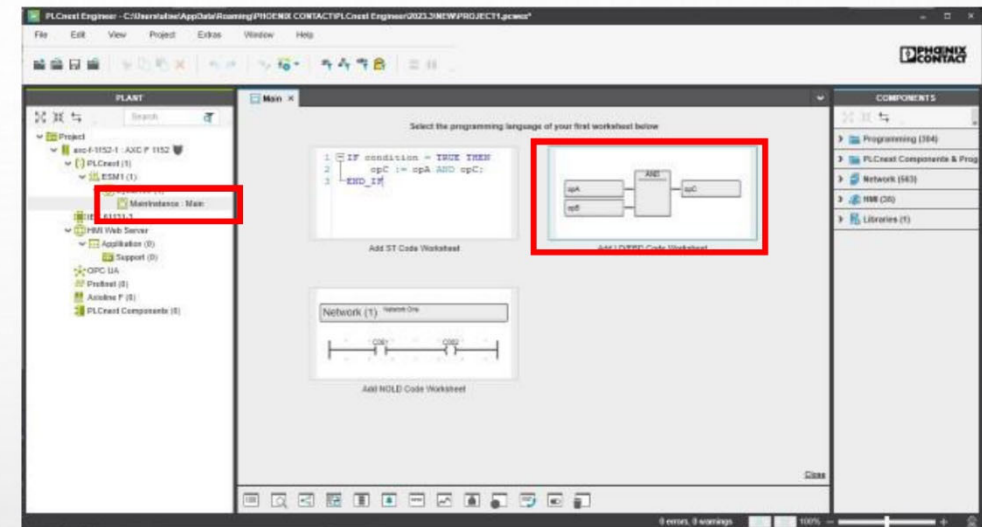
Paso 5.- A continuación, hacer doble clic en la barra lateral, sobre el dispositivo “AXC-F-2152”, para abrir la ventana “Setting” por defecto. Posteriormente, ir a su submenú lateral a la sección “Ethernet”, donde deberá configurarse con los datos de red correspondiente para cada caso.

En este ejemplo, se configurará idénticamente desde la página web embebida del dispositivo, anteriormente mencionada.



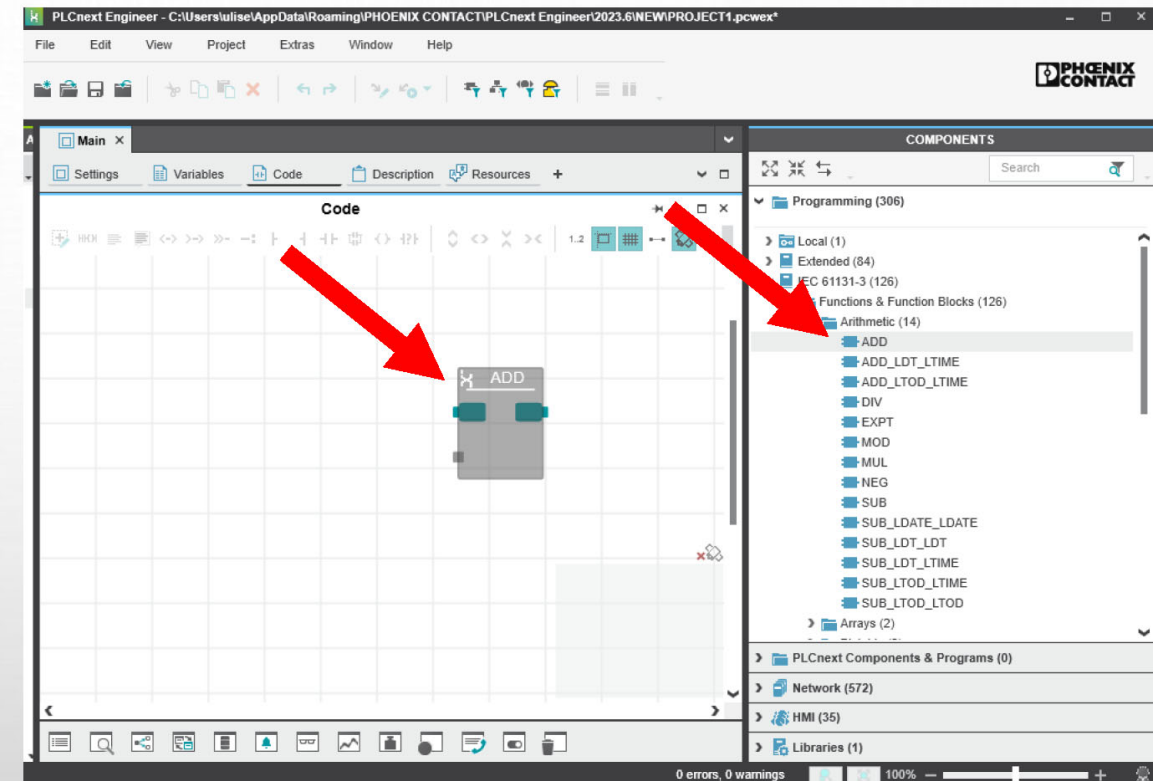
PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 6.- Posteriormente, siguiendo los procedimientos previamente descritos, se debe iniciar una hoja de trabajo utilizando el lenguaje de programación "LD/FBD Code". Este lenguaje, altamente intuitivo, facilitará la programación de las tareas necesarias.



PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 7.- Desde este punto ya se puede integrar módulos de programación desde la barra lateral derecha, la cual cuenta con una variada parrilla de opciones de control. Según el proyecto que se desee serán los módulos necesarios para generar la programación correspondiente .



PLCNEXT ENGINEER 2023 - CONFIGURACIÓN

Paso 8.- Para subir el programa, lo que sigue, es hacer click derecho sobre el dispositivo y apretar la instrucción “Write and Start Project”

