



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
PROPUESTA TECNOLÓGICA

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE
UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en
Electromecánica

AUTOR:

Guacapiña Toapanta Diego Vicente

TUTOR:

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi

Latacunga-Ecuador

Noviembre 2020 – Marzo 2021



DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Guacapiña Toapanta Diego Vicente declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA”**, siendo el Ing. Cruz Panchi Luis Rolando tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, marzo 2021

Guacapiña Toapanta Diego Vicente

C.I. 1724046444



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA”**, del ponente Guacapiña Toapanta Diego Vicente, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2021

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando

C.I. -----



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Guacapiña Toapanta Diego Vicente con el título de Proyecto de Titulación: “**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA**” han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, marzo 2021

Lector 1 (Presidente)
Ing. Porras Reyes Jefferson Alberto
C.I. 0704400449

Lector 2
Ing. Corrales Bastidas Byron Paul
C.I. 0502347768

Lector 3
Ing. Gallardo Molina Cristian Fabián
C.I. 0502847692

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo quiero exponer todos mis sentimientos de gratitud para mis padres y hermanos que me brindaron su apoyo incondicional y de esta forma se convirtieron en el principal cimiento de construcción de mi vida profesional, implantando en mí, bases de responsabilidad y deseos de superación. Por esto les ofrezco mi trabajo como ofrenda a la paciencia y amor que siempre tuvieron conmigo.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme sus puertas y haberme brindado la oportunidad de superarme y prepararme profesionalmente. Mi agradecimiento sincero a mi tutor, Ing. Luis Cruz, quien con su apoyo incondicional y profesional me impartió sus conocimientos y me guio en todo el proceso de formación profesional.

DIEGO

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a mis padres, a mi compañera de vida y de manera especial a mi hijo Derek Gabriel, posiblemente en este momento no entiendas mis palabras, pero cuando seas capaz quiero que te des cuenta de lo que significas para mí, eres la fuerza y motivación para cada día esforzarme buscando un presente y futuro mejor. A mis amigos que me han permitido aprender más de la vida a su lado; sin ustedes no habría sido posible todo esto.

Muchas gracias a todos por acompañarme en este camino.

DIEGO

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORIA	i
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
AVAL DE TRADUCCIÓN	xvi
1. INFORMACIÓN BÁSICA	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.2. TIPO DE ALCANCE.....	2
2.3. ÁREA DEL CONOCIMIENTO	2
2.4. SINOPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.5. OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	3
2.5.1. Objeto de estudio.....	3
2.5.2. Campo de acción	3
2.6. SITUACIÓN PROBLÉMICA Y PROBLEMA.....	3
2.6.1. Situación problemática:	3
2.6.2. Problema.....	4
2.7. HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DIRECTRICES	4
2.8. OBJETIVO(S).....	5
2.8.1. Objetivo general	5
2.8.2. Objetivos específicos.....	5

2.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS	5
3. MARCO TEORICO	8
3.1. Antecedentes	8
3.2. Definiciones	8
3.3. Simbología y Normas.....	10
3.4. Ejemplo de aplicación Industrial.....	10
3.5. Control automático de procesos	11
3.5.1. Sistema de control de procesos	11
3.5.2. Componentes Básicos de un Sistema de Control.....	13
3.5.3. Operaciones Básicas de un Sistema de Control	14
3.5.4. Estrategias de control	14
3.5.4.1. Control por acción precalculada.....	15
3.5.5 Controlador Lógico programable en la automatización Industrial.....	16
3.5.5.1 Selección técnica del PLC	16
3.5.5.2. Funciones.....	17
3.5.6. Reguladores industriales	18
3.5.7. Sistemas SCADA	19
3.5.7.1. Requisitos de un SCADA	20
3.6. PROGRAMAS DE SOFTWARE	21
3.6.1. Programación del Controlador (Tía Portal V14).....	21
3.6.1.1. Beneficios presentes en TIA PORTAL V14	22
3.6.1.2. Lenguajes de programación IEC	22
3.6.1.3. Elementos Básicos de un programa de control.....	23
3.6.2. Aplicación SCADA (LabVIEW 2018)	25
3.6.2.1. Elementos de un VI	26
3.6.2.2. Estructuras de Ejecución	27

3.6.2.3. Funciones Disponibles.....	28
3.6.2.4. Técnicas para eliminar errores (debugging)	29
3.6.3. Software de Simulación de la Planta.....	31
3.6.3.1. Interactuar con un plc	31
3.6.4. Software de comunicación	32
4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. Metodología Descriptiva	34
4.2. Metodología Investigativa:.....	35
4.2.1 Nivel en un Tanque	36
4.2.2. Linealización por series de Taylor	38
4.3. Metodología Deductiva	40
4.3.1. Modelamiento matemático del proceso.....	40
4.3.2. Modelo del sistema de tres tanques en cascada.....	41
4.3.3. Ecuaciones de estado para los tres tanques	42
4.3.4. Linealización del sistema no lineal de tres tanques en cascada	43
4.3.5. Linealización del modelo matemático utilizando la matriz Jacobiana.....	44
4.3.6. Modelo de matriz Jacobiana.....	44
4.3.7. Matriz de espacio de estados del sistema de tres tanques en cascada	45
4.4. Metodología Experimental.....	46
4.4.1. Configuración del objeto tecnológico regulador PID	47
4.4.2. Creación de un instrumento virtual (VI)	49
5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
5.1. Modelamiento Matemático	51
5.1.1. Función de transferencia Obtenida.....	53
5.1.2. Respuestas de los sistemas de control experimentales.....	54
5.2. Parámetros de sintonización de los controladores PID	55
5.3. Ejemplo práctico	56

6. PRESUPUESTO Y ANALISIS DE IMPACTOS	60
6.1. Presupuesto.....	60
6.1.2. Materiales tecnológicos.....	60
6.2. Análisis de impactos.....	61
6.2.1. Impacto práctico.....	61
6.2.2. Impacto tecnológico.....	61
6.2.3. Impacto epistemológico.....	61
7. CONCLUSIONES	62
8. RECOMENDACIONES	63
9. BIBLIOGRAFIA	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Actividades por objetivos	5
Tabla 3.1. Simbología ISA	10
Tabla 5.1. Respuestas de cálculos y análisis matemáticos para el sistema.....	51
Tabla 5.2. Parámetros de sintonización de los PID	56
Tabla 6.1. Presupuestos materiales tecnológicos.....	60
Tabla 6.2. Costos directos e indirectos	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de Ishikawa.....	4
Figura 3.1. Proceso de colada continua del Acero	11
Figura 3.2. Intercambiador de calor	12
Figura 3.3. Sistema de control del Intercambiador de calor.....	13
Figura 3.4. Intercambiador de calor con sistema de control por acción precalculada.....	15
Figura 3.5. Control por acción precalculada del intercambiador de calor compensación por retroalimentación.	16
Figura 3.6. Esquema de un regulador PID industrial	18
Figura 3.7. Esquema de sistema SCADA.....	19
Figura 3.8. Ejemplo de pantalla SCADA (Kimberly Clarck - Costa rica).....	21
Figura 3.9. Editor KOP.....	23
Figura 3.10. Eventos de arranque en el sistema operativo y llamadas de OB.....	24
Figura 3.11. Función con llamada desde el bloque de organización Main[OB1]	25
Figura 3.12. Diferencia entre DB global y DB de instancia.....	25
Figura 3.13. Ejemplo de un Diagrama de Bloques y Panel Frontal Correspondiente (1) Terminales de Indicador (2) Cables (3) Nodos (4) Terminales de Control	27
Figura 3.14. (1) Ciclo While de LabVIEW (2) Diagrama de Flujo (3) Código Pseudo	27
Figura 3.15. Ejemplo de Ciclo for	28
Figura 3.16. Paleta de funciones Express	29
Figura 3.17. Algunas técnicas para eliminar errores	29
Figura 3.18. Generación y lectura de un archivo con extensión LVM	30
Figura 3.19. Visualización en Excel del archivo generado por el VI Express	30
Figura 3.20. Topología del controlador en el software de simulación	31
Figura 3.21. Topología de NetToPLCsim	33
Figura 4.1. Topología del proceso	34
Figura 4.2. Nivel del proceso	36

Figura 4.3. Diagrama de bloques que representa las variaciones en un tanque	40
Figura 4.4. Tanque de la planta simulada.....	40
Figura 4.5. Diagrama del sistema de tres tanques en cascada	41
Figura 4.6. Diagrama de control del modelo matemático	46
Figura 4.7. Diagrama de control del modelo matemático con retroalimentación unitaria	46
Figura 4.8. Diagrama de control del modelo matemático con sistema de control PID	46
Figura 4.9. Diagrama de control del proceso de tres tanques con sistema de control PID	47
Figura 4.10. Adición de bloque organizacional cíclico.....	47
Figura 4.11. Agregar objeto PID	48
Figura 4.12. Bloque de datos para el objeto tecnológico PID	48
Figura 4.13. Edición de parámetro de objeto PID Compact.....	49
Figura 4.14. Demostración de la creación de un instrumento virtual VI	50
Figura 5.1. Ecuación de estado para cada Tanque.....	52
Figura 5.2. Respuesta de la función de Transferencia.....	53
Figura 5.3. Respuestas de apertura de las válvulas para los tres tanques para el llenado de cada tanque	53
Figura 5.4. Respuestas de apertura de las válvulas para los tres tanques para el vaciado de cada tanque	53
Figura 5.5. Respuesta del modelo matemático	54
Figura 5.6. Respuesta del modelo matemático con retroalimentación.....	54
Figura 5.7. Respuesta del modelo matemático con controlador PID	55
Figura 5.8. Respuesta del sistema de tres tanques en cascada con controlador PID individual	55
Figura 5.9. Respuesta de estabilización sin sobreimpulsos.....	56
Figura 5.10. Curvas SP y PV para el tanque 1	57
Figura 5.11. Tiempo de estabilización del tanque 1	57
Figura 5.12. Comportamiento de la variable de control para el tanque 1	57
Figura 5.13. Curvas SP y PV para el tanque 2	58

Figura 5.14. Tiempo de estabilización del tanque 2.....	58
Figura 5.15. Comportamiento de la variable de control para el tanque 2	58
Figura 5.16. Curvas SP y PV para el tanque 2	59
Figura 5.17. Tiempo de estabilización del tanque 2.....	59
Figura 5.18. Comportamiento de la variable de control para el tanque 3	59



Ingeniería
Electromecánica

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA”

Autor:

Guacapiña Toapanta Diego Vicente

RESUMEN

La presente propuesta tecnológica tiene como fin implementar un sistema de control basado en controladores clásicos PID en un proceso de control de nivel de tres tanques en cascada mismo que será simulado en un software específico; este sistema de control será ejecutado por un autómatas programable simulado; un algoritmo de control será previamente cargado en el mismo, de esta manera se obtiene un control en la variable de nivel del líquido para cada tanque; este proceso va a ser monitoreado a través de una aplicación SCADA implementada en un software de procesamiento y visualización de los datos que arroja el PLC, dicha aplicación permite al usuario crear un registro de datos en una hoja de cálculo para el posterior análisis del comportamiento del sistema; mediante el protocolo de comunicación TCP/IP se consigue crear un servidor OPC que permite la transmisión bidireccional de datos para que el usuario pueda tener el control manual y automático del proceso. Con la realización de este proyecto los estudiantes de ingeniería electromecánica pueden desarrollar prácticas que permitan reforzar conocimientos en campos como: modelamiento de procesos, redes de comunicación, programación de autómatas y diseño de interfaces HMI.

Palabras clave: sistemas de control, aplicación SCADA, modelamiento de procesos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE

THEME: “DEVELOPMENT OF A SCADA APPLICATION FOR LEVEL CONTROL OF A SIMULATED PROCESS OF THREE CASCADE TANKS”

Author:

Guacapiña Toapanta Diego Vicente

ABSTRACT

This technological proposal aims to implement a control system based on classic PID controllers in a level control process of three cascade tanks that will be simulated in a specific software; this control system will be executed by a simulated programmable automaton; a control algorithm will be previously loaded into it, in this way getting a control in the liquid level variable for each tank; this process will be monitored through an SCADA application implemented in a data processing and visualization software that the PLC throws, such application allows the user to create a data record in a spreadsheet for further analysis of system behavior; using the TCP/IP communication protocol it is possible to create an OPC server that allows the two-way transmission of data so that the user can have manual and automatic control of the process. With the realization of this project Electromechanical Engineering students can develop practices that allow to reinforce knowledge in fields such as: process modeling, communication networks, automaton programming and HMI interface design.

Keywords: control systems, SCADA application, process modeling.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción de la propuesta tecnológica al Idioma Inglés presentado por el señor Egresado de la Carrera de **ELECTROMECAÁNICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: GUACAPIÑA TOAPANTA DIEGO VICENTE**, cuyo título versa “**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN CASCADA**”, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimare conveniente.

Latacunga, marzo del 2021

Atentamente,

**LIC. MARÍA FERNANDA AGUAIZA
IZA DOCENTE CENTRO DE
IDIOMAS
050345849-9**

1803027935 Firmado
VICTOR digitalmente por
HUGO 1803027935
ROMERO VICTOR HUGO
GARCIA ROMERO GARCIA
Fecha: 2021.03.09
09:43:29 -05'00'

1. INFORMACIÓN BÁSICA

Propuesto por:

Diego Vicente Guacapiña Toapanta

Tema aprobado

“Desarrollo de una aplicación scada para el control de nivel de un proceso simulado de tres tanques en cascada”

Carrera

Ingeniería Electromecánica

Tutor de la propuesta tecnológica:

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi

Equipo de trabajo:

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi

Ing. Luigi Orlando Freire

Sr. Diego Vicente Guacapiña Toapanta

Lugar de ejecución:

Cotopaxi, Latacunga, San Felipe, Universidad Técnica de Cotopaxi, Laboratorio Electromecánica

Tiempo de duración de la propuesta:

6 meses

Fecha de entrega:

Febrero 2021

Línea de investigación:

Procesos industriales

Sub líneas de investigación de la carrera:

Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

Tipo de propuesta tecnológica:

El proyecto tecnológico consiste en desarrollar entorno virtual para el control de nivel de tres tanques en cascada

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

“Desarrollo de una aplicación scada para el control de nivel de un proceso simulado de tres tanques en cascada”

2.2. TIPO DE ALCANCE

Multipropósito: El sistema tiene como fin facilitar la comprensión en temas del uso de softwares de simulación, control y monitoreo de variables en el ámbito académico.

Interdisciplinar: La elaboración del sistema simulado tiene aportes teóricos y prácticos que requieren cierto nivel de conocimiento en asignaturas de programación y control de procesos industriales.

2.3. ÁREA DEL CONOCIMIENTO

Según la norma CINE - UNESCO en relación con el tema planteado se tiene:

Campo amplio: 33Ciencias Tecnológicas.

Campos específicos:3304.12 Dispositivos de Control, 3310 Tecnología Industrial, 3311 Tecnología de la Instrumentación.

Campos detallados: 3310.03 Procesos Industriales, 3311.01 Tecnología de la Automatización, 3311.02 Ingeniería de Control.

2.4. SINOPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

Los procesos industriales controlados desde una aplicación scada tienen una gran importancia debido a que se puede llevar un monitoreo y control en tiempo real del proceso, además se puede adquirir datos de manera automática de las variaciones realizadas en el proceso ; en el contexto educativo en el que se centra este proyecto es de gran importancia puesto a que con el uso de softwares especializados en monitoreo, control y simulación de procesos industriales y

afines, se tiene ideas concisas de lo que se puede hacer con el uso de dispositivos autómatas programables; En la simulación del proceso de control de nivel en cascada de tres tanques controlado mediante una aplicación scada se regula las variables inmersas en el sistema mediante la utilización de controladores PID para conseguir el estado de salida deseado. Este entorno virtual es una gran herramienta para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica ya que permite evaluar el proceso de control de nivel en cascada de tres tanques, predecir el comportamiento del proceso, experimentar y conseguir su mejor configuración.

2.5. OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.5.1. Objeto de estudio

Proceso de control de nivel en cascada de tres tanques

2.5.2. Campo de acción

De acuerdo con la norma UNESCO el proyecto se desenvuelve con varias directrices entre las principales destacan la tecnología de la Automatización y la Ingeniería de Control.

2.6. SITUACIÓN PROBLÉMICA Y PROBLEMA

2.6.1. Situación problemática:

En la Universidad Técnica de Cotopaxi previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, se imparte asignaturas que proyectan el aprendizaje de sistemas de control, programación de autómatas programables, automatización e instrumentación de procesos que son de gran importancia en la actualidad, debido a que la automatización industrial presenta una creciente acogida dentro de los procesos de producción en las PYMES a nivel Nacional; las cuales se ven afectadas por la inaccesibilidad de los estudiantes a los procesos reales para su entrenamiento, es por esto que se ve necesario acudir a softwares especializados en control, simulación de procesos industriales en los cuales se puede desarrollar aplicaciones que nos permiten experimentar con las variables que se trabaja en un ámbito práctico, conseguir una

configuración recomendada para cada tipo de controlador y así se poder tener una visión aproximada del proceso real.

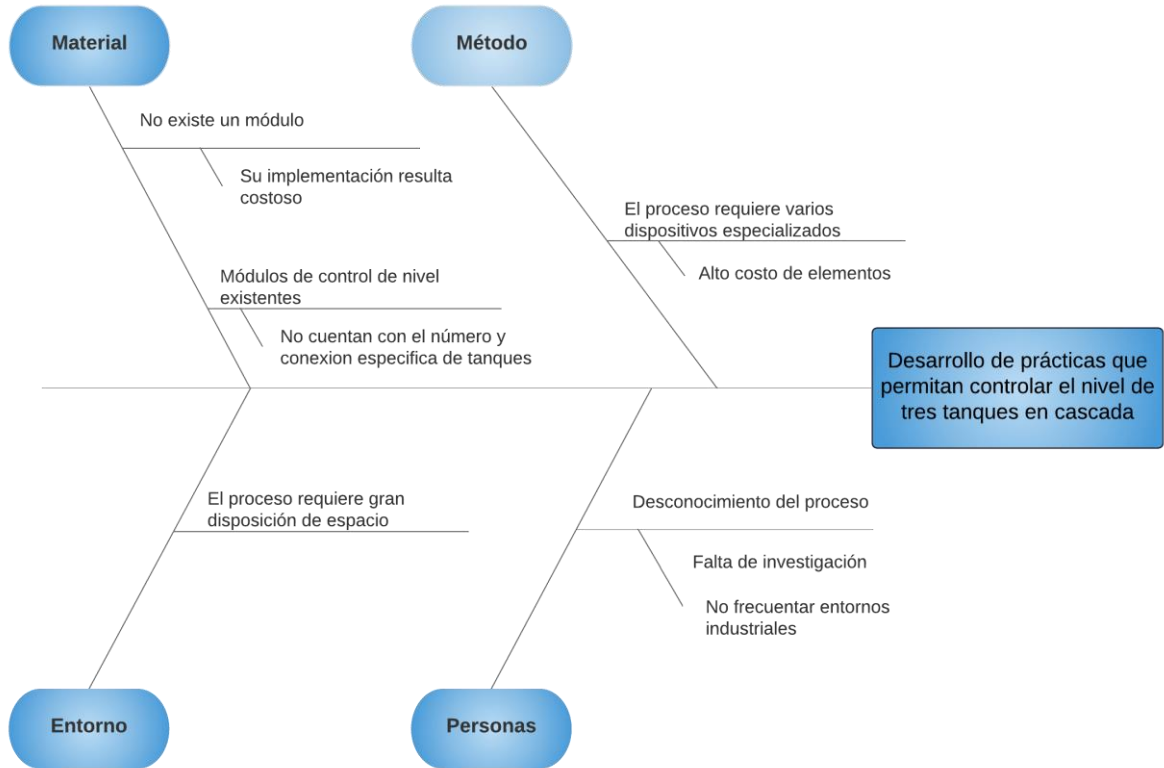


Figura 2.1. Diagrama de Ishikawa
Fuente: [Investigador]

2.6.2. Problema

La carencia de habilidades prácticas para implementar sistemas de control de nivel en un proceso de tanques en cascada

2.7. HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DIRECTRICES

Con la realización de una aplicación SCADA para el control de nivel de un proceso simulado de tres tanques en cascada permitirá desarrollar habilidades de control en este tipo de procesos.

2.8. OBJETIVO(S)

2.8.1. Objetivo general

Simular una planta de control en cascada del nivel de tres tanques, implementando el lazo de control en un autómata programable para el monitoreo y análisis de las variables del proceso desde una aplicación SCADA.

2.8.2. Objetivos específicos

- Investigar los fundamentos teóricos relacionados al control de nivel de tanques en cascada y uso de softwares específicos.
- Diseñar el diagrama del proceso y lazos de control en cascada basado en controladores PID, aplicando simbología normalizada.
- Desarrollar el algoritmo de control para procesamiento y presentación de datos.
- Realizar pruebas de funcionamiento y desarrollo de prácticas.

2.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS

Tabla 2.1. Actividades por objetivos

Objetivo	Actividades	Tareas por objetivo	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
	Investigar los fundamentos teóricos relacionados al	Investigación en libros, revistas científicas, informes y tesis relacionada al control de nivel de tanques en cascada.	Determinación de pasos a seguir para desarrollar el proyecto tomando en cuenta las recomendaciones técnicas de distintas fuentes	Investigación bibliográfica

Objetivo 1	control de nivel de tanques en cascada y uso de softwares específicos.	Investigación en libros, revistas científicas, informes y tesis información relacionada a aplicaciones scada y el uso de softwares específicos.	Recopilación de información bibliográfica para la sustentación del tema propuesto.	Investigación bibliográfica
Objetivo 2	Diseñar el diagrama del proceso y lazos de control en cascada basado en controladores PID, aplicando simbología normalizada.	Desarrollo del modelo matemático de los tres tanques en cascada	función de transferencia del sistema	Investigación bibliográfica
		Realización de la estructura topológica del proceso	Diagrama esquemático	
		Selección de Softwares	Software para la aplicación scada, recrear el ambiente y programación de los controladores	Investigación experimental
Objetivo 3	Desarrollar el algoritmo de control para procesamiento y	Diseñar el escenario virtual y el HMI para el monitoreo y control del sistema por el usuario	Conseguir una configuración recomendable y de fácil interpretación	Investigación experimental
		Elaborar el código de control para los controladores de nivel	Carga del código ejecutable al plc simulado	Investigación experimental

	presentación de datos.	Configurar la comunicación entre los softwares de monitoreo, control y simulación del proceso	Establecer comunicación entre softwares y servidor-cliente OPC	Investigación experimental
Objetivo 4	Realizar pruebas de funcionamiento y desarrollo de prácticas.	Ajustar direcciones ip	Controlar desde la aplicación scada el proceso simulado de tres tanques en cascada	Investigación experimental
		Guardar datos obtenidos del proceso simulado mediante la aplicación scada	Obtener una recopilación de datos de las variables del proceso	Investigación experimental
		Elaborar un manual de configuración y guías para la realización practicas	Manual de uso y guías	Investigación Experimental

Fuente: [Investigador]

3. MARCO TEORICO

3.1. Antecedentes

Mediante una investigación realizada en repositorios universitarios, artículos científicos e informes técnicos se determinó que existen trabajos investigativos realizados en 2017; tales como “Diseño de un controlador PID con comunicación inalámbrica para una planta de 3 tanques” [23], el cual consiste en simular la automatización de la planta de 3 tanques del laboratorio de control automático con comunicación inalámbrica y un controlador PID, de la misma manera se simula un sistema de monitoreo y control para la validación del diseño del sistema de automatización “Diseño y Programación de Varias Estaciones de Trabajo Mediante el Uso de PLC y Softwares Específicos”[11], en el cual consiste en simular de forma virtual, el comportamiento de varias estaciones de trabajo automatizadas, cuyo control es llevado a cabo mediante la programación de un PLC que forma parte del repositorio de la Universidad de Valladolid; además se encontró proyectos investigativos que guardan mayor relación al tema planteado, tales como “Sistema de control de nivel aplicando un PID en un modelo de un distribuidor de colada continua”[8] en el cual se obtiene el modelo matemático que representa la operación de un distribuidor de colada continua de acero y a la vez se implementa un controlador PID para la regulación del proceso; se consideró también la investigación de maestría realizada por Daniel García de la universidad de Valladolid con el título de “Simulación y Diagnóstico de una Instalación Industrial mediante Factory I/O y OPC”[24] Se ha empleado un simulador de instalaciones industriales, Factory I/O adaptando la instalación real a una instalación, para el control de esta instalación se ha realizado un programa de PLC con Siemens Step 7 (modelo CPU 315-2 PN/DP) capaz de simular algún modo de funcionamiento de la instalación, pero con un código más sencillo. Se ha creado un servidor OPC capaz del acceder al autómatas simulado y conectarlo con un cliente en Python; en el título “Diseño de un sistema HMI/SCADA para una planta de clasificación con visión artificial” [15] se utiliza las librerías de creación de documentos en LabVIEW para recopilar los datos del proyecto en una hoja de cálculo, las recomendaciones de programación del entorno gráfico son de gran utilidad ya que el autor hace referencia a ejemplos de fácil comprensión.

3.2. Definiciones

Planta. Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En este

libro se llamará planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial). [1]

Sistema. Es una composición de elementos que actúan adyacentes y realizan un objetivo. Un sistema no está necesariamente limitado a los procedimientos físicos. [1]

Variable controlada y señal de control o variable manipulada. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado. [1]

Variable de proceso (PV). Es el valor de la variable en un instante dado en el proceso. Ejemplo: al calentar un horno inicialmente está a temperatura ambiente, luego de 5 min, la temperatura está en un valor de 40°C. para ese instante el valor de PV es de 40°C. [7]

Set point (SP). Es el valor de consigna o el valor que se desea obtener en el proceso [7]

Perturbación. Es una indicación que tiene efectos negativos en el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se crea dentro del proceso se designa como perturbación interna, caso contrario se conoce como perturbación externa la que se genera fuera del sistema y se considera como una entrada. [1]

Control realimentado. Este tipo de control hace referencia a una operación que, en presencia de efectos negativos que afectan al sistema (perturbaciones), tiende a disminuir la diferencia entre la salida de un procedimiento y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. [1]

Circuito abierto o lazo Abierto. Hace referencia a la condición en la cual se desconecta el controlador del proceso; el controlador no realiza funciones correctivas para mantener la variable de control en el punto de referencia. [5]

Control de circuito cerrado. Hace referencia a la condición en la cual se enlaza el controlador al proceso; el controlador contrasta el punto de control con la variable de control para determinar una acción correctiva. [5]

Señal de transmisión. Son señales que son utilizadas para la transmisión de información entre los instrumentos de un sistema de control. En la actualidad son tres las más utilizadas: Señal Neumática normalmente abarca entre 3 y 15 psig, Señal Eléctrica, normalmente toma valores entre 10 y 50 mA, de 1 a 5 V ó de 0 a 10 V; y la Señal Discreta o Digital (unos y ceros). [5]

3.3. Simbología y Normas

Las normas son indispensables para la Referencia de un instrumento O de una función de sistema de control Qué se requiere para la simbolización e identificación. Algunas referencias conocidas son:

Diagramas de sistemas de instrumentación, diagramas lógicos, descripciones funcionales. Diagramas de Flujo: Procesos, mecánicos, ingeniería, Sistemas, Que conduce por tuberías (el proceso) e instrumentación. Identificación de instrumentos y funciones de control, instalación, operación e instrucciones de mantenimiento. (ver ANEXO 07)

Tabla 3.1. Simbología ISA

Conexión de proceso o suministro	
Señal Neumática	
Señal Eléctrica	
Tubo Capilar	
Señal Indefinida	
Línea de Software	
Línea Mecánica	
Señal electromagnética o de sonido	
Señal Hidráulica	
El símbolo de señal neumática es usado de esta forma cuando se trata de aire.	AS aire suministrado ES Suministro eléctrico GS Suministro de Gas HS Suministro Hidráulico NS Suministro de Nitrógeno SS Suministro de vapor WS Suministro de agua

Fuente: [26]

3.4. Ejemplo de aplicación Industrial

- **Proceso de Distribuidor de colada continua de acero**

El proceso de colada continua del acero es una tecnología aplicada en la industria siderúrgica y ha sido uno de los mayores avances en la producción del mismo; su aplicación comienza a

extenderse desde los años 70 reemplazando paulatinamente al método convencional de lingotes debido a que presenta ventajas si se los compara con los métodos convencionales, tales como: mayor rendimiento, trabajo en secuencia, mejor calidad del producto colado.

Esto ha dado origen a que un porcentaje mayor al 85 % de la producción a nivel mundial de acero sea realizada usando el proceso de colada continua, mientras que en décadas anteriores este proceso correspondía a un valor del 15. [6]

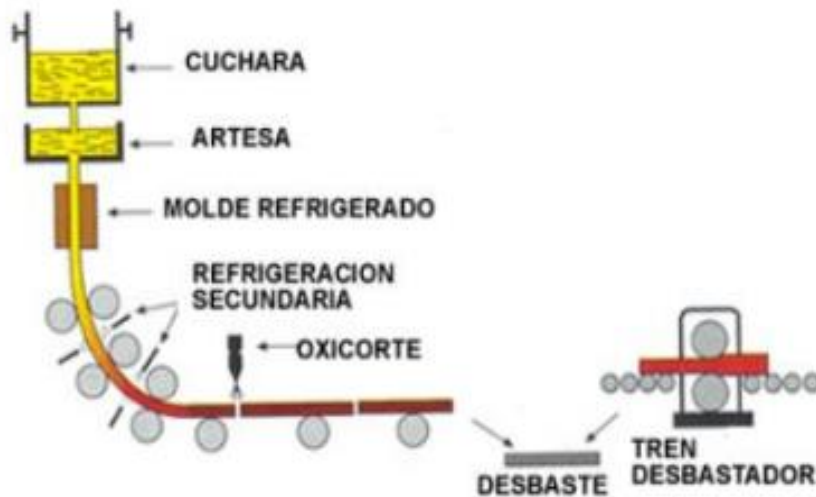


Figura 3.1. Proceso de colada continua del Acero
Fuente: [6]

3.5. Control automático de procesos

El objetivo de controlar de manera automática un proceso es mantener un valor de operación determinado en las variables del proceso como pueden ser: temperatura, presión, velocidad de flujo másico, entre otras; sin necesidad que intervenga el operador.

Por la naturaleza dinámica de los procesos las variables inmersas en cada sistema son aptos de ser medidas mediante dispositivos especializados y comparados con un valor deseado para ejercer una acción correctiva en las variables principales del proceso es decir las que se relacionan directamente con la calidad del producto, seguridad, índices de producción y no cumplirá las condiciones de diseño y operación.

3.5.1. Sistema de control de procesos

Es un sistema de regulación automática en el que la salida es una variable como: temperatura, presión, nivel de líquido o pH, etc. Tiene una amplia aplicación en la industria, con frecuencia

se utilizan controles programados; por ejemplo: Se considera un intercambiador de calor en el cual la corriente que se procesa (fluido) se calienta mediante vapor de condensación.

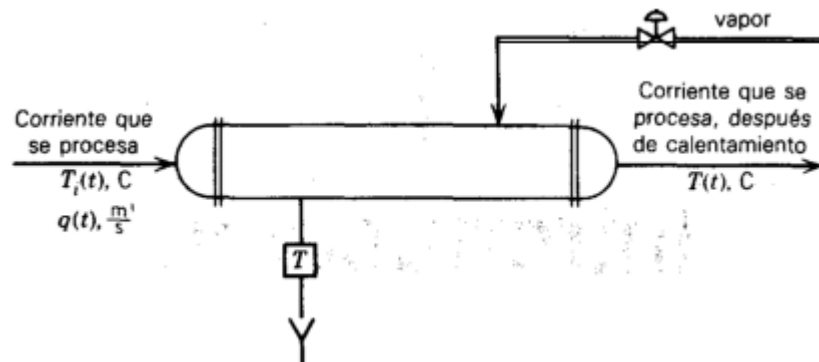


Figura 3.2. Intercambiador de calor

Fuente: [5]

El propósito de la unidad es calentar el fluido que se procesa, de una temperatura dada de entrada $T_i(t)$, a cierta temperatura de salida, $T(t)$, que se desea. Como se dijo, el medio de calentamiento es vapor de condensación y la energía que gana el fluido en proceso es igual al calor que libera el vapor, siempre y cuando no haya pérdidas de calor en el entorno, esto es, el intercambiador de calor y la tubería tienen un aislamiento perfecto; en este caso, el calor que se libera es el calor latente en la condensación del vapor. En este proceso existen muchas variables que pueden cambiar, lo cual ocasiona que la temperatura de salida se desvíe del valor deseado, si esto llega a suceder, se deben emprender algunas acciones para corregir la desviación; esto es, el objetivo es controlar la temperatura de salida del proceso para mantenerla en el valor que se desea. Una manera de lograr este objetivo es primero, medir la temperatura $T(t)$, después comparar ésta con el valor que se desea y, con base en la comparación, decidir qué se debe hacer para corregir cualquier desviación. Se puede usar el flujo del vapor para corregir la desviación, es decir, si la temperatura está por arriba del valor deseado, entonces se puede cerrar la válvula de vapor para cortar el flujo del mismo (energía)

hacia el intercambiador de calor. Si la temperatura está por abajo del valor que se desea, entonces se puede abrir un poco más la válvula de vapor para aumentar el flujo de vapor (energía) hacia el intercambiador. Todo esto lo puede hacer manualmente el operador y puesto que el proceso es bastante sencillo no debe representar ningún problema. Sin embargo, en la mayoría de las plantas de proceso existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado y con este procedimiento de corrección se requeriría una cantidad tremenda de operarios, por ello, sería preferible realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador. [5]

Para cumplir con esta meta se debe plantear e implementar un sistema de control. En la fig. 3.3 se indica un sistema de control y sus elementos básicos. El primer paso es censar la temperatura de salida, esto se hace con la ayuda de un dispositivo especializado (termopar, termómetros de sistema lleno, termistores, etc.). El sensor se vincula físicamente al transmisor, el cual recibe la señal de salida del sensor para convertirla en una señal lo suficientemente intensa para transmitirla al controlador, El controlador capta dicha señal, y la compara con el valor deseado para tomar una decisión posterior que mantenga la temperatura en el valor deseado, en base a esta acción el controlador transmite otra señal al elemento final de control el cual controla el flujo de vapor. [5]

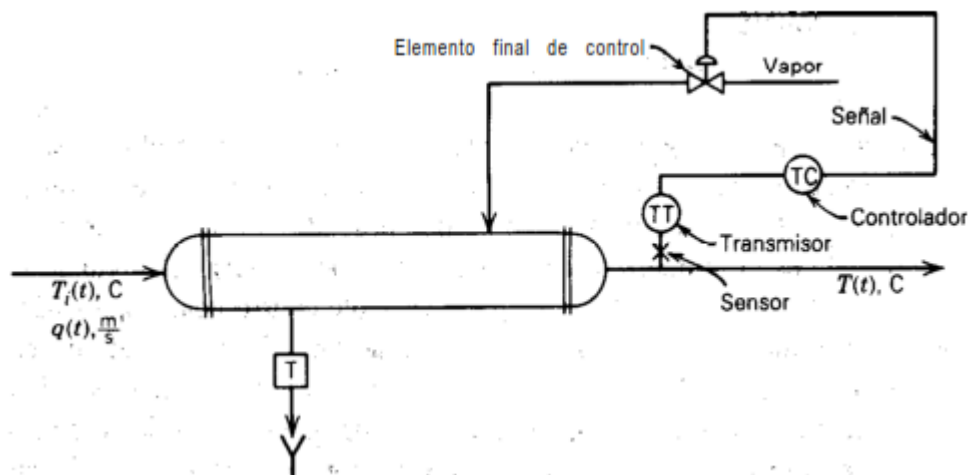


Figura 3.3. Sistema de control del Intercambiador de calor
Fuente: [5]

3.5.2. Componentes Básicos de un Sistema de Control

Los 4 elementos básicos de los sistemas de control son los encargados de desempeñar las operaciones del sistema y son:

- **Sensor:** que también se conoce como elemento primario.
- **Transmisor:** el cual se conoce como elemento secundario.
- **Controlador:** que es el “cerebro” del sistema de control.
- **Elemento final de control:** frecuentemente se trata de una válvula de control, aunque no siempre. Otros elementos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

3.5.3. Operaciones Básicas de un Sistema de Control

La importancia de los componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control; estas operaciones son: [5]

- **Medición:** Esta acción de censado de la variable controlada se hace con la combinación entre el dispositivo encargado de medir (sensor) y el transmisor
- **Decisión:** Basado en la medida, el controlador toma una decisión correctiva para mantener la variable de control en el punto de referencia o set point.
- **Acción:** La acción generalmente es realizada por el elemento final de control que puede ser una electroválvula un motor, etc.

3.5.4. Estrategias de control

Determina la estructura que sigue la información o señales en el lazo, dependiendo de la aplicación (entorno de trabajo, máquina) a gobernar se define el actuar de las variables del proceso. En función a la información obtenida se incorpora determinados instrumentos y/o equipos (sensores, controladores, etc.) con los cuales se obtendrá estabilidad en el sistema o aplicación; y su disposición será en jerarquía o circuito específico determinado por el ingeniero de proceso. Por lo general cada entorno de trabajo tiene una estrategia establecida.

A continuación, se enlista algunas estrategias de control:

- Control por retroalimentación.
- Control de razón.
- Control en cascada.
- Control por acción precalculada.
- Control por sobre posición.
- Control selectivo.
- Control de proceso multivariable.

La estrategia mayormente monopolizada es la de retroalimentación, debido a que las otras estrategias simbolizan una mayor inversión en varios aspectos como pueden ser: el equipo, mano de obra, implementación y mantenimiento. Es por eso que resulta necesario un análisis antes de realizar la inversión de efectuar un sistema de control en un proceso. Es significativo reiterar que aun en estrategias avanzadas se demanda alguna retroalimentación.

Tomando en cuenta lo anterior a continuación se describe únicamente el control por acción precalculada.

3.5.4.1. Control por acción precalculada

Este tipo de control usa la medición de una perturbación para usarla como información adicional y así mejorar el índice de funcionamiento de un controlador de lazo simple; la medida provee una “temprana advertencia” de una perturbación que a futuro causara efectos no deseados en la variable controlada en el futuro y con esta referencia el controlador por acción precalculada ajusta la variable manipulada antes que la variable controlada se desvíe de la referencia o Set Point. El controlador por acción precalculada no usa una salida del proceso; El control por acción precalculada es usualmente implementado con control por realimentación

“El objetivo del control por acción precalculada es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control; si se aplica de manera correcta, la variable controlada no se desvía del punto de control.” [5]

Un ejemplo concreto de control por acción precalculada es el intercambiador de calor que aparece en la fig. 3.2

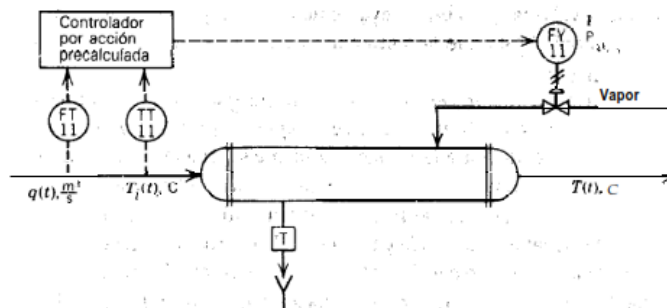


Figura 3.4. Intercambiador de calor con sistema de control por acción precalculada.

Fuente: [5]

Supóngase que las perturbaciones “más serias” son la temperatura de entrada, $T_i(t)$, y el flujo del proceso, $q(t)$; para establecer el control por acción precalculada primero se debe medir estas dos perturbaciones y luego se toma una decisión sobre la manera de manejar el flujo de vapor para compensar los problemas; Ilustrado en la fig. 3.4, el controlador por acción precalculada decide cómo manejar el flujo de vapor para mantener la variable controlada en el punto de control, en función de la temperatura de entrada y el flujo del proceso.

En el proceso existen varios tipos de perturbaciones; el sistema de control por acción precalculada que se muestra en la fig. 3.4 solo compensa a dos de ellas, en el caso de añadir otra perturbación al sistema este podría entrar en un error total y la variable de proceso tendría una gran diferencia con respecto al set point. Para evitar esta desviación se debe añadir alguna retroalimentación que compense al sistema; esto se muestra en la fig. 3.5. en este caso las perturbaciones más serias son corregidas por el control Por acción precalculada, $T(t)$ y $q(t)$, y las perturbaciones menos importantes son compensadas por la retroalimentación. [5]

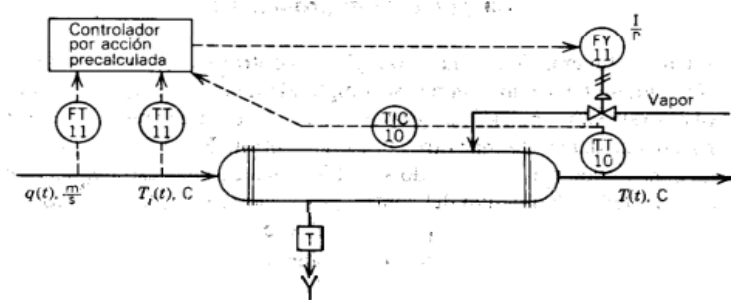


Figura 3.5. Control por acción precalculada del intercambiador de calor compensación por retroalimentación.

Fuente: [5]

Es importante hacer notar que en esta estrategia de control más “avanzada” aún es tan presentes las tres operaciones básicas: M, D y A. Los sensores y los transmisores realizan la medición; la decisión la toma el controlador por acción Precalculada y el controlador por retroalimentación, TIC-10; la acción la realiza la válvula de vapor.

3.5.5 Controlador Lógico programable en la automatización Industrial

Los PLC o autómatas programables son dispositivos electrónicos que permiten programar una lógica para controlar todo tipo de procesos y maquinas industriales, de esta forma se convierten en un punto clave para la modernización de las empresas, desde los años 60 han reemplazado a los antiguos sistemas de control basados en circuitos eléctricos, relés, entre otros.

3.5.5.1 Selección técnica del PLC

Para seleccionar un autómata programable se debe tener en consideración algunos criterios que orientan a tomar una decisión adecuada, algunos de los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta son:

- Conocer el proceso que requiere Automatización
- Estructura modular o compacta.

- Cantidad de entradas / salidas de que dispone.
- Tipo de entradas y salidas: Analógicas o digitales.
- Rangos de operación de las entradas y salidas.
- Cantidad de contadores, temporizadores y registros.
- Lenguajes de programación.
- Software especializado para cada modelo de autómata programable
- Capacidad de realizar conexión en red de varios autómatas programables.

3.5.5.2. Funciones

Los PLC's industriales cada vez tienen un mayor rango de aplicaciones a medida que las prestaciones de la microelectrónica y las comunicaciones aumentan, esto a echo que el PLC sea bien aceptado por la industria. [4]

- **Detección:** Lectura de señales.
- **Mando:** Obtener y remitir acciones hacia el sistema por medio de accionadores.
- **Interacción hombre-máquina:** Conservar una correlación con los operadores de producción, acatando sus órdenes y comunicando del estado del proceso.
- **Programación:** Para elaborar el algoritmo del programa de aplicación del autómata.
- **Redes de comunicación:** Autoriza las acciones de comunicación entre diversas zonas de control; además permite desarrollar acciones de comunicación e intercambio de datos con otros autómatas.
- **Sistemas de supervisión:** otorgan permisos de comunicación entre ordenadores provistos de software especializado en supervisión industrial este proceso se hace a través de una red Industrial o por la conexión del puerto serial del ordenador.
- **Control de procesos continuos:** Los autómatas tienen funciones incorporadas que admiten el control de procesos continuos, tales como: añadir módulos de entradas y salidas analógicas o ejecutar programas de control tipo PID programados en el Autómata.
- **Entradas-Salidas distribuidas:** Los módulos de E/S pueden tener una ubicación física diferente a la del Autómata y estos a su vez pueden estar conectados con la unidad central mediante cable de red.
- **Buses de campo:** Con el uso de cables de comunicación se puede tener conexiones con el bus de sensores y actuadores.

3.5.6. Reguladores industriales

Son computadores cuyo propósito específico es el control de procesos continuos mediante regulaciones tales como la regulación clásica PID; además incorporan funciones modelos de referencia y funciones menos complejas como el control on-off de dos y tres estados, algunos dispositivos disponen de funciones auxiliares sobre la señal que es medida, dichas funciones pueden ser extracción de la raíz cuadrada, el filtrado y funciones de acción compleja como la de generación de funciones para linealizar la señal obtenida en el sensor.

- **Controlador PID:** Es un mecanismo de control que se realiza por medio de un lazo cerrado por retroalimentación; el cual permite regular una variable deseada como pueden ser: presión, flujo, nivel entre otras; este mecanismo permite realizar un cálculo de desviación o también llamado error y crea la señal de control mediante la diferencia entre un valor medido y un valor de referencia, los parámetros fundamentales se presentan a continuación.
 - **Acción Proporcional (P):** Se encarga de medir el valor actual del proceso y el set point aplicando cambios
 - **Acción Integral (I):** Hace referencia al tiempo que deberá tomar la acción correctiva; cabe recalcar que mientras menor sea el valor su ajuste se realizará más rápido.
 - **Acción Derivativa (D):** Permite predecir el error para ejecutar la acción correctiva oportunamente.

Con la aparición de los microprocesadores los reguladores dejaron de ser analógicos para convertirse en digitales; estos últimos tienen mejores características debido a que se incorporan salidas especiales que facilitan llevar un histórico de la variable controlada. [4]

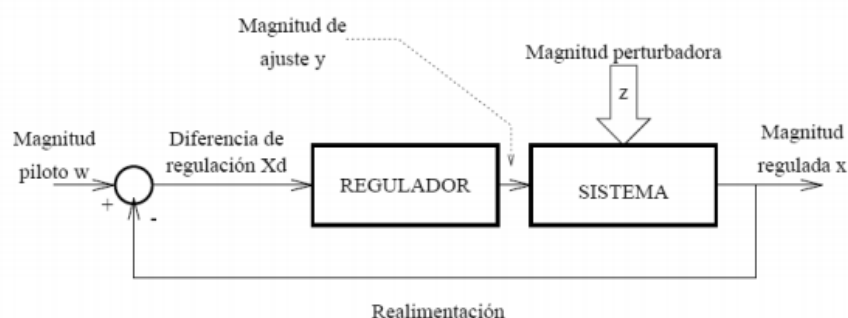


Figura 3.6. Esquema de un regulador PID industrial

Fuente: [4]

El funcionamiento se detalla a continuación:

- La magnitud regularizada es estudiada y cuantificada en lapsos de tiempo discretos.
- La operación PID es llevada a cabo por un script en un procesador, y en cada punto de lectura se computa una igualdad diferencial. Los parámetros P, I, D pueden ser ajustados independientemente.
- El valor calculado es procesado a través de un convertidor digital/analógico para luego ser conectado al segmento de regulación y este valor se mantiene hasta la llegada del siguiente.

3.5.7. Sistemas SCADA

SCADA viene de las siglas “Supervisory Control And Data Acquisition”; es decir sistema de adquisición de datos y control supervisor, tradicionalmente se define a un SCADA como un sistema que permite supervisar una planta o un proceso por medio de una estación central (MTU) y una o varias unidades remotas (generalmente RTUs) por medio de los cuales se hace el control / adquisición de datos hacia/desde el campo. [2]

Esquemáticamente, un sistema SCADA conectado a un proceso automatizado consta de las siguientes partes

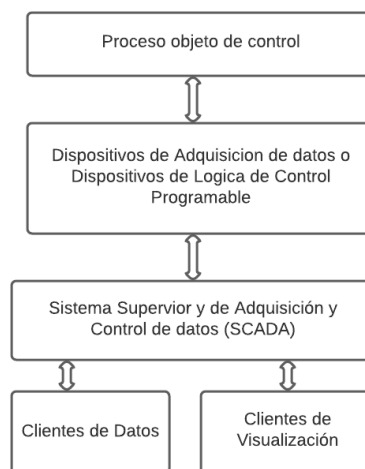


Figura 3.7. Esquema de sistema SCADA
Fuente: [2]

1. **Proceso Objeto de control:** Es el proceso que se desea supervisar. En consecuencia, es el origen de los datos que se requiere coleccionar y distribuir.
2. **Adquisición de datos:** Son un conjunto de instrumentos de medición dotados de alguna interface de comunicación que permita su interconexión.
3. **SCADA:** Combinación de hardware y software que permita la colección y visualización de los datos proporcionados por los instrumentos
4. **Clientes:** conjunto de aplicaciones que utilizan los datos obtenidos por el sistema SCADA

El termino supervisión es un punto clave ya que significa que es un operador humano el que toma la decisión final sobre las operaciones, generalmente críticas, de una planta industrial; esta idea se contrapone a la idea generalizada, que en la unidad central se hace control automático del proceso supervisado. Es cierto que puede hacerse control automático evaluando suficientemente su implementación considerando la confiabilidad de los enlaces de transporte de datos desde y hacia el campo ya que una falla de comunicación significa dejar fuera de control el proceso.

3.5.7.1. Requisitos de un SCADA

Se presenta algunos requisitos que debe tener un sistema SCADA para sacarle el máximo provecho [3]

- Deben ser sistemas de arquitecturas abiertas, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente para el usuario con el equipo de planta (drivers) y con el resto de la empresa (acceso a redes locales y de gestión).
- Los programas deben ser sencillos de instalar, sin excesivas exigencias, y fáciles de utilizar, con interfaces amables con el usuario (sonido, imágenes, pantallas táctiles)

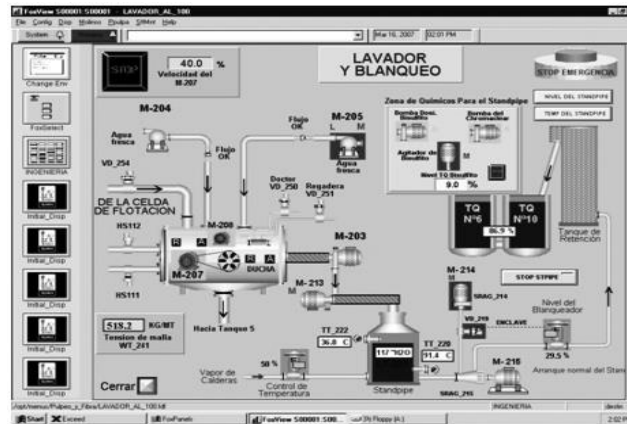


Figura 3.8. Ejemplo de pantalla SCADA (Kimberly Clarck - Costa rica)
Fuente: [3]

3.6. PROGRAMAS DE SOFTWARE

El software es un conjunto de instrucciones detalladas que controlan la operación de un sistema computacional; La industria moderna tiene como reto integrar las necesidades de los clientes con las distintas tecnologías de automatización utilizados en procesos industriales; estas tecnologías permiten contar con sistemas efectivos, robustos, y autónomos de las tareas que se ejecutan en los procesos internos de las industrias.

A continuación, se detallan los principios básicos de los programas software específicos para el desarrollo del proyecto.

3.6.1. Programación del Controlador (Tía Portal V14)

Siemens presenta el software TIA Portal de Automatización Total Integrada como software de desarrollo para la sistematización de PLC's y HMI's. integra diversos productos SIMATIC en un software que permite ampliar la productividad y la eficiencia del proceso; además garantiza al usuario un entorno de ingeniería homogéneo.

Un programa eficiente suministra al beneficiario un servicio de ayuda apreciable durante todo el periodo de vida de la máquina o instalación; este proceso comienza con acciones de planificación para su posterior implementación y continuar con acciones de configuración , programación y puesta en marcha y finaliza con el funcionamiento y la actualización; el Software garantiza una gran consistencia de los datos durante el desarrollo del proceso por su capacidad de integración y de compatibilidad. [9].

Este software de programación es uno de los más conocidos y que es mayormente utilizado a escala mundial en un contexto de automatización industrial; esto se debe a que el usuario puede realizar acciones de probar, diagnosticar, programar y configurar varios dispositivos tales como:

controladores modulares, controladores basados en PC y paneles básicos. Además, el software es compatible con llamadas al servidor OPC UA que permite la comunicación estandarizada e integrada dentro de las plantas o en cada máquina en la que se realice los procedimientos para su automatización y también es compatible con niveles MES /SCADA/ IT.

3.6.1.1. Beneficios presentes en TIA PORTAL V14

“En el campo de ingeniería de producción, la plataforma de software TIA Portal es la puerta de entrada a la automatización en la Empresa Digital.” [10]

- **Comisionamiento Virtual:** Se obtiene una mayor seguridad en diseños debido a que se tiene la capacidad de simular máquinas o procesos antes de implementar sistemas automatizados de esta forma se tiene un comisionamiento virtual de forma más eficiente y realizado en un menor tiempo.
- **Almacenamiento en la Nube:** Los usuarios pueden acceder al sistema de control de la planta debido a su máxima flexibilidad con la ingeniería basada en procesos de respaldos en la nube esto es posible por su nueva tecnología denominada “TIA Portal Cloud Connector”
- **Sistema Abierto:** El software posee una función denominada “Team center”, esta es la suite de colaboración de Siemens que permite integrar distintas versiones de un proyecto desde su planificación y diseño hasta su puesta en marcha.
- **Funcionalidad Multi Usuario:** Esta funcionalidad permite que varias personas tengan acceso a un mismo proyecto de forma simultánea y eficiente lo que permite organizar tareas, además presenta una opción de sincronización automática.

3.6.1.2. Lenguajes de programación IEC

TIA PORTAL presenta herramientas que facilitan tareas simples como arrastrar y soltar, y también tareas más complejas como crear listas de referencias cruzadas a nivel de todo el proyecto etc. Además, se reduce la probabilidad de cometer errores gracias a la programación homogénea y se dispone de la información actualizada respecto a los datos debido a la integración de los distintos editores en un único entorno de trabajo. [11]

A continuación, se presenta unos tipos de lenguajes de programación que ofrece el software.

- **KOP y FUP:** Estos lenguajes gráficos de programación han incrementado su utilización debido a sus potentes herramientas y funcionalidades integradas; se considera que están a la misma altura que los lenguajes textuales.

- **AWL:** Este tipo de programación se basa en una estructura textual, permitiendo al usuario crear programas propios de hardware teniendo una optimización en el espacio de almacenamiento y en el tiempo de ejecución.
- **GRAPH:** Este lenguaje es utilizado para describir sistemas secuenciales con continuaciones de ciclos alternativos o paralelos a este lenguaje también se lo conoce como Programa de cadenas secuenciales.

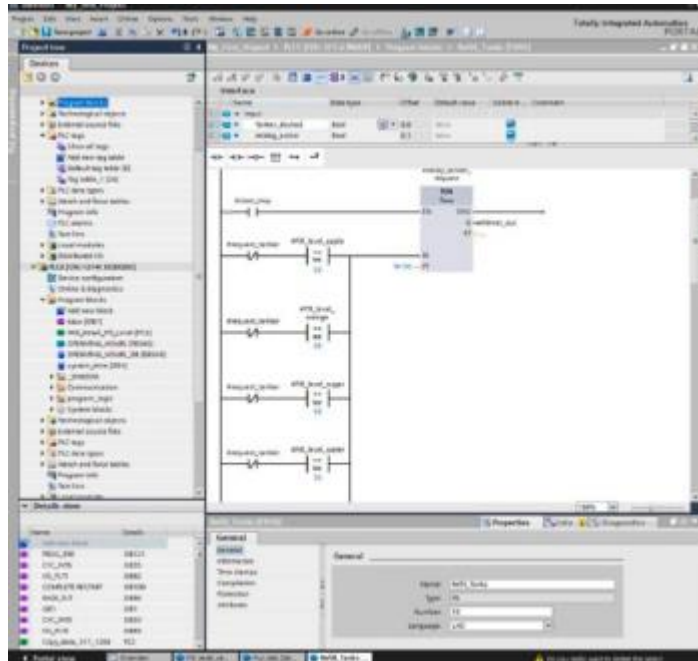


Figura 3.9. Editor KOP
Fuente: [11]

3.6.1.3. Elementos Básicos de un programa de control

- **Bloques de organización:** Forman la interfaz entre el sistema operativo del controlador (CPU) y el programa del usuario, pueden ser utilizados para una serie de funciones a continuación se presenta unos ejemplos
 - Ejecución en bucle
 - Ejecución de programas controlados por alarmas
 - Procesamiento de errores

Siempre debe existir como mínimo un bloque de organización para el procesamiento en bucle del programa. Para realizar una acción de llamada a otro ciclo OB es necesario que suceda un programa de arranque, ver fig. 3.10. [12]

Para que un OB 82 pueda interrumpir el funcionamiento del bloque OB1 con el objetivo de procesar errores; previo la ejecución de un programa de arranque; es posible que la acción del sistema reaccione así:

- Si la preferencia del OB determinado es superior en comparación al OB que acaba de ejecutarse, este último se realiza una acción de interrupción. de esta forma los ciclos se ejecutan respondiendo a la prioridad que se le asigne
- En el caso que no se determine ningún OB al evento, se inicia la reacción predeterminada en el sistema. [12]

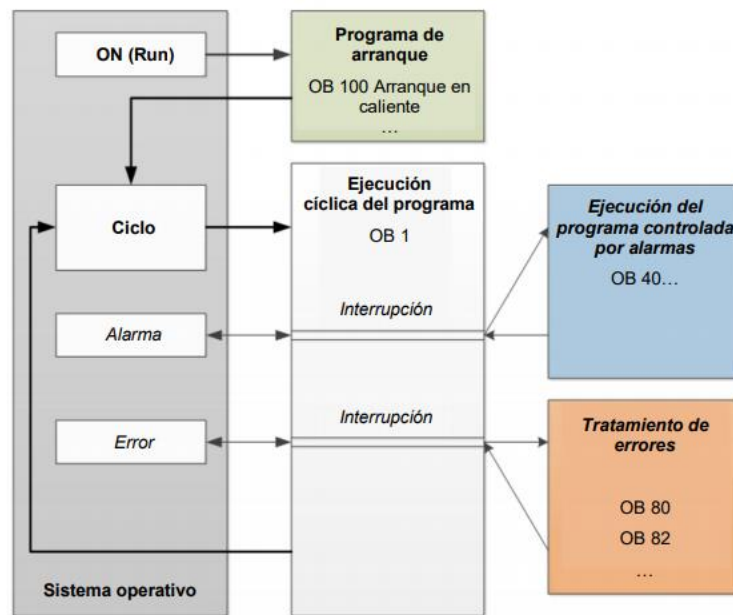


Figura 3.10. Eventos de arranque en el sistema operativo y llamadas de OB

Fuente: [12]

- **Funciones:** Las funciones (FC) son bloques lógicos sin memoria, es decir, no disponen de una “data memory” que es necesaria para almacenar valores de medidas de bloque. Es por esto que, se debe conectar todos los ajustes de interfaz al llamar una función de este tipo ya que esto permite guardar datos de forma permanente, conjuntamente se debe crear bloques de datos globales. Estas funciones son utilizadas para distintos fines a continuación se presentan algunos casos:
 - **Funciones matemáticas:** Este tipo de función que entrega un resultado en función de los valores de entrada
 - **Funciones tecnológicas:** Este tipo es utilizado como controles individuales con operaciones lógicas binarias.

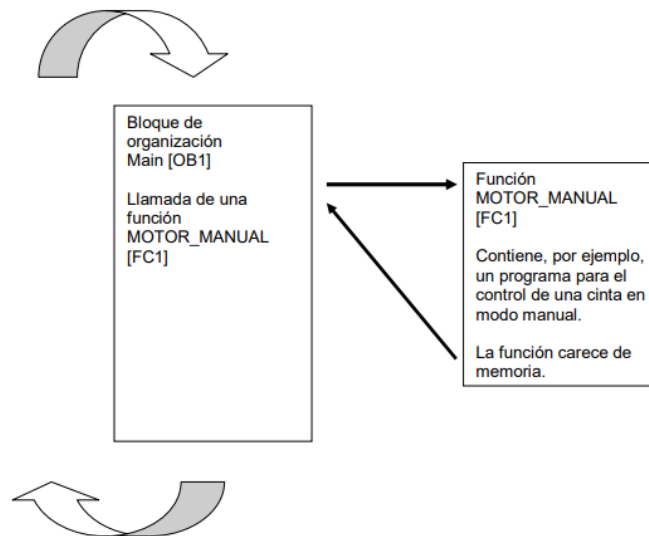


Figura 3.11. Función con llamada desde el bloque de organización Main [OB1]

Fuente: [12]

- **Bloques de datos globales:** Este tipo de bloques no contiene instrucciones y son utilizados para almacenar datos de usuario; pueden contener datos de variables con las que opera el programa, este bloque de datos puede definirse a discreción. Estos datos almacenados pueden ser utilizados por los demás bloques ver fig. 3.11. para hacer esto se debe acceder a los bloques de datos de instancia que corresponden a cada bloque de función. El tamaño máximo de los mencionados bloques varía en función de la CPU.

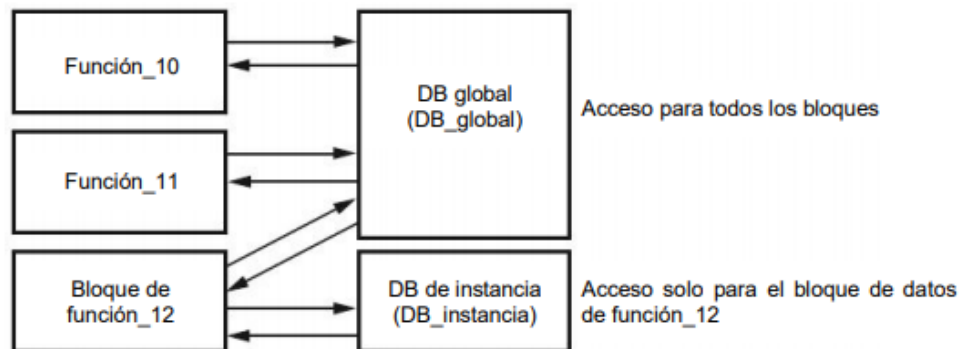


Figura 3.12. Diferencia entre DB global y DB de instancia.

Fuente: [12]

3.6.2. Aplicación SCADA (LabVIEW 2018)

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es un entorno de diseño y desarrollo de scripts o procedimientos con un lenguaje gráfico. Este lenguaje acelera el desarrollo de programas, aumentando así su eficiencia. Al crear un programa en LabVIEW, se desarrolla VI (Instrumento Virtual) el cual contiene la interfaz gráfica del sistema y el diagrama de bloques (Algoritmo). [13]

LabVIEW es utilizado principalmente para la administración de datos, Desarrollar intercambio de datos o “comunicarse” un aparato o circuito externo con una computadora, por lo que LabVIEW puede establecer una comunicación con interfaces como: Puerto serial, Puerto paralelo, TCP/IP, Bluetooth, USB, OPC, entre otros.

3.6.2.1. Elementos de un VI

los programas realizados en el software son denominados instrumentos virtuales o VI's, debido a que su apariencia imita a los elementos físicos tales como osciloscopios, entre otros

- **Panel frontal:** La ventana de panel frontal es la interfaz de usuario para el VI, se construye con controladores e indicadores, los cuales son los terminales interactivos de entrada y salida del VI
- **Controladores e indicadores:** Los elementos de cada programa de LabVIEW se pueden definir como controles o indicadores; un elemento de control es aquel que puede ser controlado o modificado por el usuario, los indicadores son elementos que no pueden ser modificados por el usuario, solamente muestran datos o resultados que el programa arroja. [13]
 - **Dato numérico:** El programa representa datos numéricos tales como: números de punto flotante, números de punto fijo, números enteros con y sin signo y números complejos. Los datos numéricos enteros son representados por el color azul y los de tipo complejo por el color naranja.
 - **Dato booleano:** Son aquellos que funcionan con un cero o un uno, siendo falso o verdadero respectivamente, no tienen otro valor más que esos. Se representan con el color verde y con las letras t o f.
 - **Dato de cadena:** Es una secuencia de caracteres ASCII, se usan para recibir textos desde el usuario o para mostrar texto hacia el usuario, los objetos más comunes son las tablas y cajas de texto.
- **Diagrama de bloques:** Los objetos del diagrama de bloques incluyen terminales, subVI's, funciones, constantes, estructuras y cables, los cuales transfieren datos junto con otros objetos del diagrama de bloques.
 - **Flujo de datos:** el software sigue un modelo de flujo de datos para ejecutar VI's. Un nodo de diagrama de bloques se ejecuta cuando recibe todas las entradas requeridas; produciendo datos de salida y los transmite hacia el siguiente nodo en la trayectoria del flujo de datos determinando el orden de ejecución de los VI's

- **Terminales:** Son puertos de entrada y salida encargados de transferir información entre el diagrama de bloques (código) y el panel frontal y

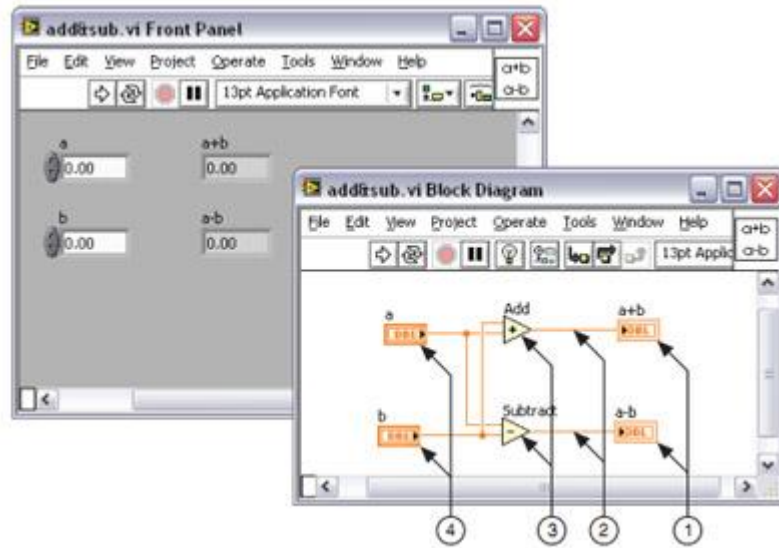


Figura 3.13. Ejemplo de un Diagrama de Bloques y Panel Frontal Correspondiente (1) Terminales de Indicador | (2) Cables | (3) Nodos | (4) Terminales de Control

Fuente: [14]

3.6.2.2. Estructuras de Ejecución

Las estructuras de ejecución contienen secciones de código gráfico y controlan cómo y dónde el código dentro se ejecuta. Las más comunes son Ciclos While, For y Estructuras de Casos, que son utilizados para ejecutar la misma sección del algoritmo repetidas veces o para la ejecución de una parte designada del algoritmo con base en alguna condición.

- **Ciclos While:** Está ubicado en la paleta Structures; ejecuta el algoritmo que domina hasta la terminal condicional, al llegar a la condición este genera un dato booleano

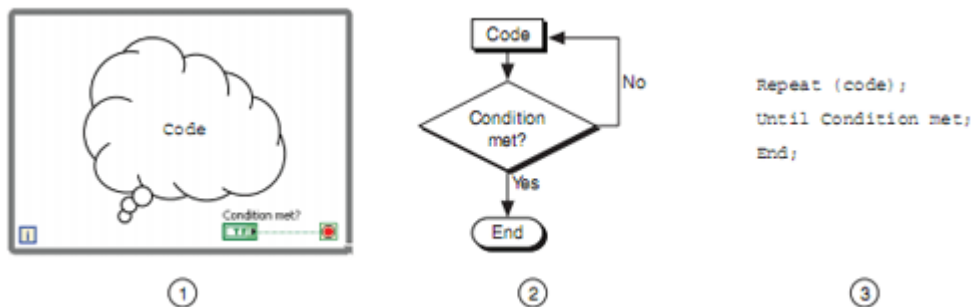


Figura 3.14. (1) Ciclo While de LabVIEW | (2) Diagrama de Flujo | (3) Código Pseudo

Fuente: [14]

- **Ciclos For:** Ejecuta un número de veces establecido el algoritmo o la sección del código establecida por el programador.

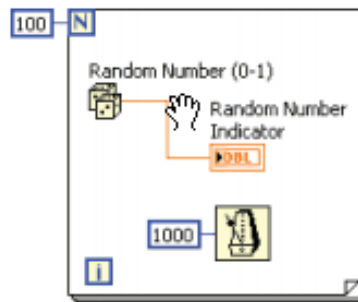


Figura 3.15. Ejemplo de Ciclo for
Fuente: [14]

N La terminal de conteo es de entrada cuyos valores muestran la cantidad de veces que se repite el sub diagrama.

i La terminal de iteración es de salida, y sujeta el valor de iteraciones ejecutadas.

3.6.2.3. Funciones Disponibles

LabVIEW contiene, en sus librerías funciones pre-construidas que facilitan la adquisición de datos, así como también su análisis y presentación. En su gran mayoría estas funciones están dentro de la paleta “Express” [15]

A continuación, se presenta algunas funciones:

- **Entrada y salida**
 - Simulación de datos y señales
 - Adquisición y reproducción de señales reales
 - Colaborador para herramientas de entrada y salida
 - ActiveX para interactuar con otras herramientas de software
- **Análisis**
 - Procesamiento de señales
 - Estadísticas
 - Matemática y desarrollo de fórmulas avanzadas
 - Recursos en tiempo continuo
- **Almacenamiento**
 - De archivos de entrada y salida

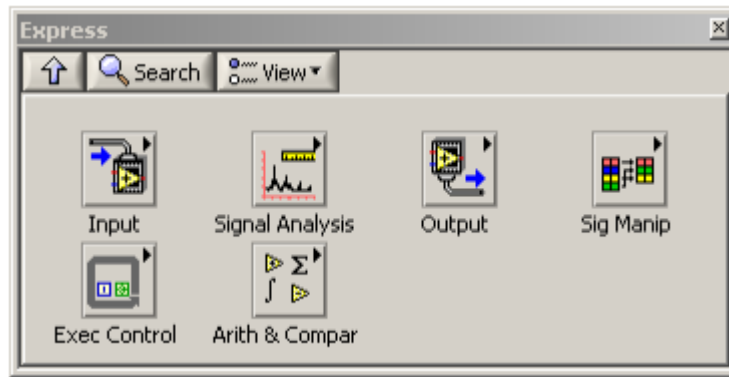


Figura 3.16. Paleta de funciones Express
Fuente: [15]

En LabVIEW se puede construir varios tipos de interfaces como la HMI usando un conjunto de instrumentales y objetos. La interfaz en la cual el usuario tiene una presentación grafica se define como el “Front Panel”. El diagrama de bloques contiene este Algoritmo. De alguna forma el diagrama de bloques re ajusta el diagrama de flujo. [15]

3.6.2.4. Técnicas para eliminar errores (debugging)

LabVIEW posee un compilador interprete en línea, es decir mientras se realiza el programa se realiza automáticamente un debugging del segmento de código, lo que permite al programador saber a tiempo que es lo que está haciendo mal, cuando se produce un error el software no permite que el VI se ejecute y aparece el botón de ejecutar (RUN) con una flecha quebrada en la barra de herramientas

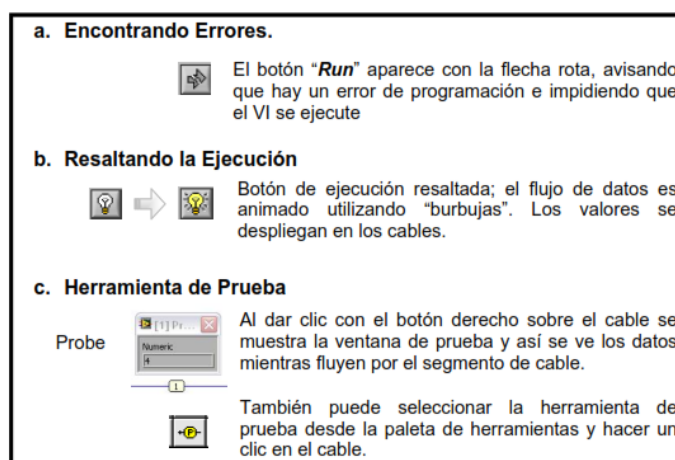


Figura 3.17. Algunas técnicas para eliminar errores
Fuente: [15]

A continuación, se presenta un ejemplo del uso del VI Express “write to Measurement File” en el cual el objetivo es crear un archivo con una señal simulada, y luego se va a estudiar esa misma

señal, de igual manera se expone la hoja de cálculo obtenida del programa en el cual se grafica con la ayuda de las herramientas propias de Excel.

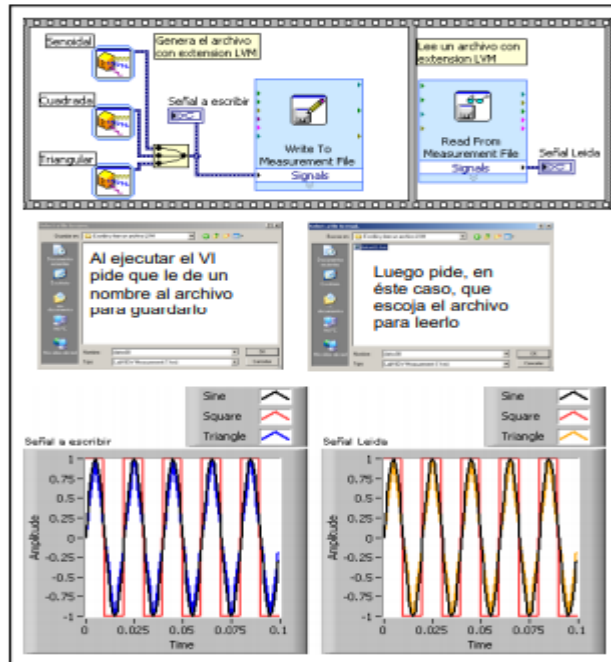


Figura 3.18. Generación y lectura de un archivo con extensión LVM
Fuente: [15]

SE nota que, el VI Express “write to Measurement File”, no tiene gran complejidad y tiene un alto nivel de abstracción. En la fig. 3.39 se presenta el archivo en Excel en el cual se ha graficado las señales creadas, de esta forma se tiene una alternativa de analizar estos datos. [15]

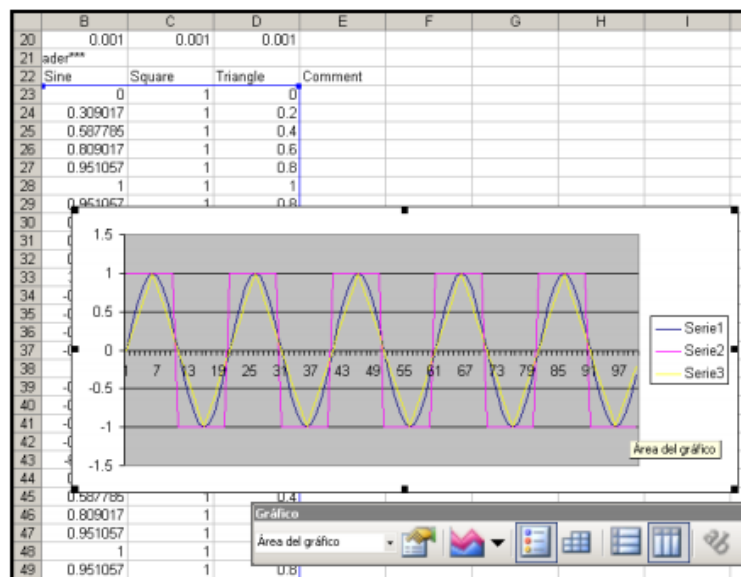


Figura 3.19. Visualización en Excel del archivo generado por el VI Express
Fuente: [15]

3.6.3. Software de Simulación de la Planta

En la actualidad existe una variedad de software que permiten la simulación de procesos industriales con la programación de varios controladores tales como un PLC, para el desarrollo del proyecto se ha elegido el software FACTORY I/O en su periodo gratuito de prueba.

Factory I / O es una simulación de fábrica en 3D para el aprendizaje de tecnologías de automatización. Diseñado para ser fácil de usar, permite construir rápidamente una fábrica virtual utilizando una selección de piezas industriales comunes. Factory I / O también incluye muchas escenas inspiradas en aplicaciones industriales típicas, que van desde niveles de dificultad principiantes hasta avanzados.

El escenario más común es utilizarlo como una plataforma de capacitación de PLC, ya que los PLC son los controladores más comunes que se encuentran en aplicaciones industriales. Sin embargo, también se puede utilizar con microcontroladores, SoftPLC, Modbus, entre muchas otras tecnologías. [17]

3.6.3.1. Interactuar con un plc

Un controlador de E / S es una función agregada de Factory I / O responsable de comunicarse con un controlador externo. El programa incluye varios tipos de controladores de E / S, cada uno para una tecnología específica según los parámetros establecidos por el fabricante de cada uno. Después de seleccionar un controlador se configura este para que sepa cómo interactuar y cómo leer y escribir E / S desde él. [17]

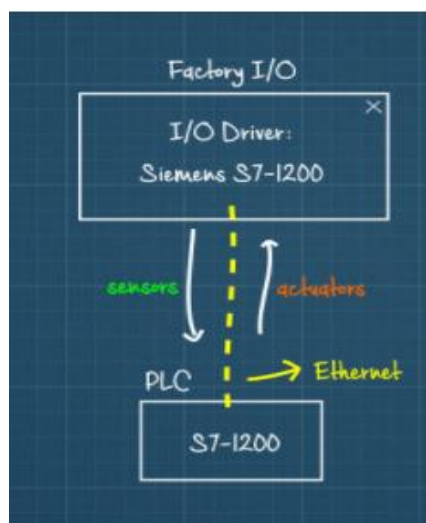


Figura 3.20. Topología del controlador en el software de simulación

Fuente: [17]

3.6.4. Software de comunicación

- **Ni OPC server:** Estos servidores proporcionan una sola interfaz sólida para comunicarse con diversos dispositivos por medio del estándar OPC. Es un complemento de software para LabVIEW que convierte los protocolos industriales patentados a los protocolos abiertos OPC Classic y OPC Unified Architecture (UA). Esto hace posible la comunicación con diferentes controladores lógicos programables (PLC) suministrando un escenario que brindar medidas y control de alto rendimiento a los sistemas industriales. [18]
 - Funciona con LabVIEW y clientes OPC
 - Contiene controladores para PLC's, desde legado basado en serial hasta los basados en Ethernet
 - Diagnósticos OPC para rápida depuración

Se recomienda formar la tabla en el primer inicio y sobre escribir únicamente cuando sea necesario. Estos tags pueden ser reemitidos desde el software de programación y también pueden ser importados por él NI OPC server [22]

“La arquitectura OPC es un modelo Cliente-Servidor donde el Servidor OPC proporciona una interfaz al objeto OPC y lo controla. Una aplicación cliente OPC se comunica a un servidor OPC a través de un cliente OPC específico por medio de una interfaz de automatización. El servidor OPC lleva a cabo la interfaz cliente, y opcionalmente lleva a cabo la interfaz de automatización.” [24]

- **Módulo LabVIEW Datalogging and Supervisory Control:** Este módulo ayuda a desarrollar aplicaciones de registro de datos como pueden ser HMI/SCADA. Es un programa adjunto para el entorno de programación LabVIEW. Se utiliza este módulo para crear sistemas de monitoreo y control en las cuales son necesarias varias etiquetas; además incluye herramientas que permiten crear registros de datos a una base de datos en red, rastrear tendencias de datos, administrar alarmas. [19]
- **NetToPLCsim:** Es una extensión de red TCP / IP para el software de simulación PLCSIM de Siemens, con este programa se puede simular, por ejemplo, sistemas SCADA a través de red en combinación si tener un PLC en físico solo usando el simulador S7-PLCSIM [16]

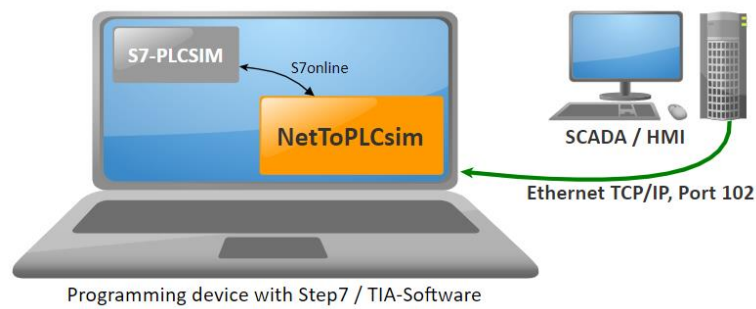


Figura 3.21. Topología de NetToPLCsim

Fuente: [16]

- **Protocolo de comunicación TCP/IP:** Se compone de dos protocolos precisos para la comunicación por Internet: el TCP (Transmission Control Protocol) y el IP (internet protocol); este término abarca también el ICPM (Internet Control Message), y el UDP (User Datagram Protocol), es decir, TCP/IP no es una técnica, sino una recopilación de protocolos. Todos tienen como referencia que, se han transformado en estándares de comunicación en red. [20]
 - **Modelo TCP/IP:** Es un término compuesto en relación con los protocolos fundamentales de Internet, y puede ser utilizado en otras situaciones. Además, existen otros métodos que referencian a TCP/IP. De forma afín al modelo OSI, este sistema representa todos los contextos de comunicación en las redes. Y consta de 7 capas a diferencia del modelo TCP/ IP que se representa por cuatro capas diferentes las cuales ejecutan distintas acciones y por lo tanto protocolos.
 - **Capa de acceso de red.** En este modelo no se ha definido ningún protocolo; en las aplicaciones prácticas como pueden ser Ethernet y radiofrecuencia (IEEE802.11). esta capa sirve para enlazar varias sub redes por ejemplo la red doméstica WLAN de un router.
 - **Capa de Internet.** En esta capa actúa el protocolo de Internet y se asegura de que los datos transportados lleguen al destino correcto usando la dirección IP.
 - **Capa de transporte.** Este permite una comunicación de terminal a terminal, para conectar dos dispositivos. En esta capa se incluye el protocolo UDP.
 - **Capa de aplicación.** En esta capa se controla la comunicación de los programas, que utilizan protocolos HTTP y FTP. Los protocolos POP o SMTP de correos electrónicos tienen lugar en esta capa.

4. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se detalla los aspectos metodológicos que permiten alcanzar el objetivo del proyecto, basado en el modelamiento matemático del sistema, así como también en el uso de herramientas de software que garantizan el funcionamiento del proyecto de simulación.

4.1. Metodología Descriptiva

En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo. [21]

A continuación, se presenta el diagrama de proceso que se implementara para el funcionamiento normal del proyecto.

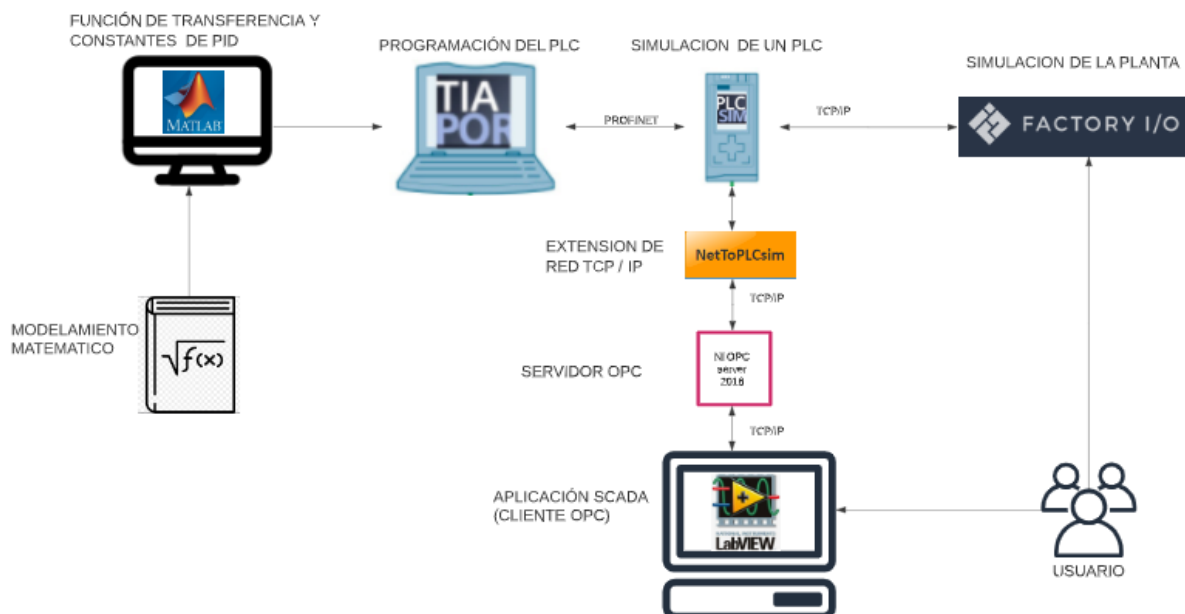


Figura 4.1. Topología del proceso
Fuente: [Investigador]

Descripción:

Mediante un análisis del proceso se obtiene un modelo matemático que lo representa; es decir se obtiene las ecuaciones de estado para cada tanque y se procede a linealizarlas aplicando el utilizando la expansión de Taylor y de esta forma se obtiene un modelo de matriz de espacio de estados para este sistema y, mediante la utilización del software especializado Matlab se obtiene la Función de transferencia del sistema, y mediante la aplicación de una técnica de control

basado en controladores PID y de las herramienta de auto sintonización que ofrece el software se obtiene los parámetros de ajuste de los controladores;

El código de programación de los controladores PID para cada tanque estará realizada en el software TIA Portal para luego cargar este algoritmo en un PLC Siemens 1214 ACDCRly simulado en el software PLCsim; mediante una extensión de red (NETTOPLCSIM) se transmite las variables hacia un OPC (cliente) para que sean procesadas en una aplicación SCADA por el software de monitoreo (LabVIEW) mediante una interfaz (HMI) previamente diseñada donde el usuario puede controlar las variable deseada en el proceso, en este caso el nivel de cada tanque; el proceso estará simulado en un software industrial específico de realidad aumentada

4.2. Metodología Investigativa:

Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar de éste, con el fin de determinar la interacción con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio. [21]

El proyecto consiste en simular una planta de nivel de tres tanques conectados en cascada que simula el proceso real de un distribuidor de colada continua que es ampliamente usado en la industria siderúrgica. La variable independiente del sistema es el flujo del líquido a través de los tanques interconectados; la variable dependiente va a ser el nivel de líquido en cada uno de los tanques; puesto a que es un sistema ideal se desprecia las pérdidas de presión entre otras variables que pudieran afectar al proceso; además se debe tener en cuenta que el proceso va a ser simulado mediante un la combinación de programas de software que permiten el procesamiento y presentación de datos por lo que los resultados a esperar son:

- Obtener el modelo matemático del sistema
- Implementar un sistema de control cascada para el proceso
- Controlar el nivel de líquido en los tanques mediante una aplicación scada

4.2.1 Nivel en un Tanque

Se considera el proceso mostrado en la fig. 6, en el cual se tiene interés en conocer cómo responde al nivel, $h(t)$, del líquido en el tanque a los cambios en el flujo de entrada, $q_i(t)$, y a los cambios en la apertura de la válvula de salida, $v_p(t)$. [5]

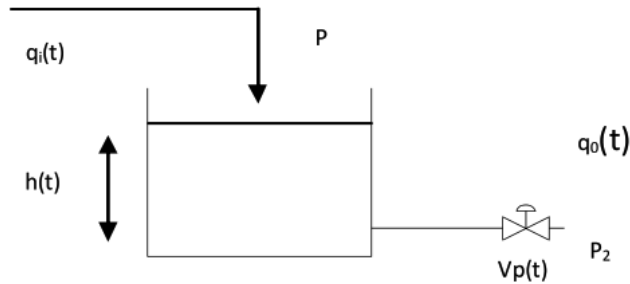


Figura 4.2. Nivel del proceso
Fuente: [8]

El flujo a través de la calcula está dado por:

$$q(t) = C_v(v_p(t))\sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G}} \quad (4.1)$$

donde:

$q(t)$ = flujo, gpm.

C_v = coeficiente de la válvula, gpm/(psi)^{1/2}

$v_p(t)$ = posición de la valvula. Este término representa la fracción de apertura de la válvula; si su valor es 0, eso indica que la válvula está cerrada; si su valor es 1, indica que la válvula está completamente abierta.

$\Delta P(t)$ = caída de presión a través de la válvula, psi.

G = gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula, sin dimensiones.

Para el proceso, la caída de presión en la válvula está dada por:

$$\Delta P(t) = P + \frac{\rho gh(t)}{144g_c} - P_2 \quad (4.2)$$

donde:

P = presión sobre el líquido, psia

ρ = densidad del líquido, lbm/pies³

g = aceleración debida a la gravedad, 32,2 pies/seg²

g_c = factor de conversión, 32.2 lbm-pies/lbf-seg²

$h(t)$ = nivel en el tanque, pies

P_2 = presión de salida de la válvula hacia adelante, psia

En esta ecuación se supone que las pérdidas por fricción a lo largo del conducto que va del tanque a la válvula son despreciables.

- balance de masa de estado dinámico del tanque:

$$\frac{\rho q_i(t)}{7.48} - \frac{\rho q_o(t)}{7.48} = \frac{dm(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Ó

$$\frac{\rho q_i(t)}{7.48} - \frac{\rho q_o(t)}{7.48} = A\rho \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.4)$$

Donde:

A = Área transversal del tanque; pies²

7.48 = factor de conversión de gal a pies³

La densidad de entrada es igual a la de salida, entonces se tiene:

$$q_i(t) - q_o(t) = 7.48A \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.5)$$

1 ecuación, 2 incógnitas ($q_o(t)$, $h(t)$)

Se tiene una ecuación con dos incógnitas y, se debe encontrar la ecuación independiente de la válvula para describir el proceso:

$$q_o(t) = C_v(vp(t)) \sqrt{\frac{(P + \frac{\rho gh(t)}{144g_c} - P_2)}{G}} \quad (4.6)$$

2 ecuaciones, 2 incógnitas

Con este sistema de ecuaciones, (5) y (6), se describe al proceso. Para simplificar esta descripción se puede substituir la ecuación (6) en la (5):

$$q_i(t) - C_v(vp(t)) \sqrt{\frac{(P + \frac{\rho gh(t)}{144g_c} - P_2)}{G}} = 7.48A \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Por la naturaleza no lineal del segundo término en el lado izquierdo de la misma. La forma ideal de resolverla analíticamente es linealizando el término no lineal.

4.2.2. Linealización por series de Taylor

La serie de Taylor proporciona una buena forma de aproximar el valor de una función en un punto en términos del valor de la función y sus derivadas en otro punto; para realizarlo se toma la parte hasta donde el sistema es lineal, es decir la primera parte.

A continuación, se presenta la serie de Taylor

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x - a)^1 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!} (x - a)^n$$

Se aplica esta técnica en la ecuación (7); Puesto que este término se debe realizar respecto a h y vp , la Linealización se debe hacer alrededor de los valores \bar{h} y \bar{vp} , que son los valores nominales de estado estacionario:

$$q_0(t) = \bar{q}_0 + \left. \frac{\partial q_0}{\partial vp} \right|_{ss} (vp(t) - \bar{vp}) + \left. \frac{\partial q_0}{\partial h} \right|_{ss} (h(t) - \bar{h})$$

Ó

$$q_0(t) = \bar{q}_0 + C_v \sqrt{\frac{\left(P + \frac{\rho g \bar{h}}{144 g_c} - P_2\right)}{G}} (vp(t) - \bar{vp}) + \frac{C_v \rho g \bar{vp}}{288 g_c G} \left[\frac{P + \frac{\rho g \bar{h}}{144 g_c} - P_2}{G} \right]^{-\frac{1}{2}} (h(t) - \bar{h})$$

Para simplificar la notación,

$$C_1 = C_v \sqrt{\frac{\left(P + \frac{\rho g \bar{h}}{144 g_c} - P_2\right)}{G}}$$

Y

$$C_2 = \frac{C_v \rho g \bar{vp}}{288 G g_c} \left[\frac{P + \frac{\rho g \bar{h}}{144 g_c} - P_2}{G} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

De manera que

$$q_0(t) = \bar{q}_0 + C_1 (vp(t) - \bar{vp}) + C_2 (h(t) - \bar{h}) \quad (4.8)$$

Al sustituir en la ecuación (4,7), se obtiene una ecuación lineal:

$$q_i(t) - \bar{q}_0 - C_1(vp(t) - \bar{vp}) - C_2(h(t) - \bar{h}) = 7.48A \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.9)$$

Con la ecuación diferencial lineal, se obtiene la función de transferencia que se desea. Realizando un análisis de balance de masa de estado estacionario del tanque se tiene:

$$\rho \bar{q}_i - \rho \bar{q}_0 = 0$$

Ó

$$\bar{q}_i - \bar{q}_0 = 0$$

Al sustraer esta ecuación de (9) se obtiene:

$$(q_i(t) - \bar{q}_i) - C_1(vp(t) - \bar{vp}) - C_2(h(t) - \bar{h}) = 7.48A \frac{dh(t)}{dt}$$

se define las siguientes variables de desvío.

$$Q_i(t) = q_i(t) - \bar{q}_i$$

$$VP(t) = vp(t) - \bar{vp}$$

$$H(t) = h(t) - \bar{h}$$

Se sustituyen estas variables en la ecuación diferencial linealizada:

$$Q_i(t) - C_1VP(t) - C_2H(t) = 7.48A \frac{dH(t)}{dt}$$

Ordenando algebraicamente, se tiene:

$$\tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) = K_1Q_i(t) - K_2VP(t)$$

Donde:

$$\tau = 7.48A/C_2, \text{ minutos}$$

$$K_1 = 1/C_2, \text{ pies/gpm}$$

$$K_2 = C_1/C_2, \text{ pies/posición de la válvula}$$

Finalmente se obtiene la transformada de Laplace

$$\frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K_1}{\tau s + 1} \quad (4.10)$$

Y

$$\frac{H(s)}{VP(s)} = \frac{-K_2}{\tau s + 1} \quad (4.11)$$

K_1 es la ganancia de $Q_1(t)$, en relación a $H(t)$, es decir, el valor de cambio del nivel por unidad de cambio de flujo de entrada. K_2 indica el valor de cambio de nivel por unidad de cambio en el estado de la válvula. El signo de la ganancia es negativo, es decir, conforme el estado de la válvula se abre la misma, el nivel cambia negativamente. [5]

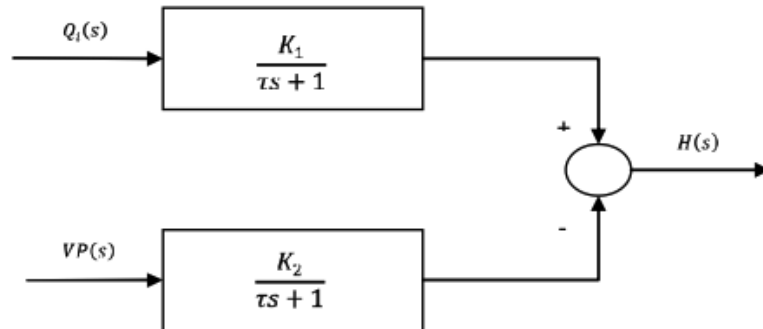


Figura 4.3. Diagrama de bloques que representa las variaciones en un tanque
Fuente: [5]

4.3. Metodología Deductiva

4.3.1. Modelamiento matemático del proceso

- Características del modelo del tanque



Figura 4.4. Tanque de la planta simulada
Fuente: [Investigador]

$h = 3\text{m}$

\varnothing tanque = 1,5 m

\varnothing tubería = 4in = 0,1016m

En $t = 3,5\text{ s}$: $h_{\min} = 5\text{cm}$, por lo tanto:

$$v = \frac{h}{t} \quad (4.12)$$

$$v = \frac{5\text{cm}}{3,5\text{s}}$$

$$v = 1,43\text{ cm/s} = 0,0143\text{ m/s}$$

Se considera el área A de cada tanque constante como:

$$A_{\varnothing} = \pi r^2 \quad (4.13)$$

$$A_{\emptyset} = \pi(0.75m)^2$$

$$A_{\emptyset} = 1,77m^2 = A1 = A2 = A3$$

Dedución del caudal

$$Q = vA_{\emptyset} \tag{4.14}$$

$$Q = 0,0143 \text{ m/s } (1,77m^2)$$

$$Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.2. Modelo del sistema de tres tanques en cascada

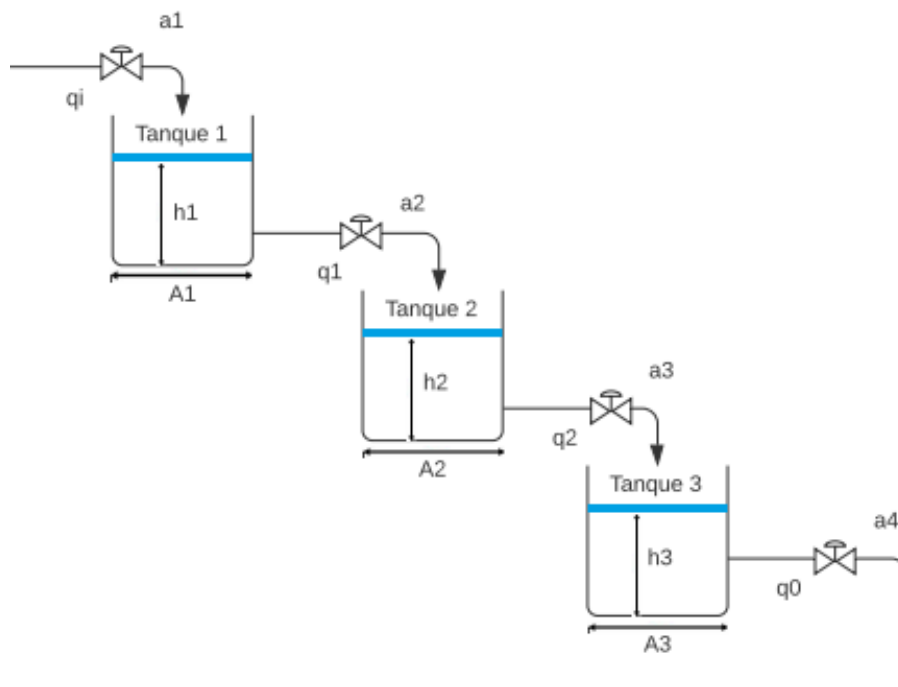


Figura 4.5. Diagrama del sistema de tres tanques en cascada
Fuente: [Investigador]

Aplicando el principio de Bernoulli de la conservación de energías tenemos:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

Donde:

- m = masa
- v = velocidad
- g = gravedad
- h = altura

despejando la velocidad se obtiene:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Por lo tanto, el flujo de salida para cada tanque para una sección transversal es

$$Q = Sv$$

Flujo a través de una válvula

$$Q_s = S a \sqrt{2gh}$$

Donde:

- S = constante
- a = abertura de la válvula
- g = gravedad
- h = altura

Calculo de la constante K para el flujo a través de la válvula

$$Q_s = S a \sqrt{2gh} = Q_s = S a \sqrt{2g} \sqrt{h}$$

Consideración de $\emptyset = 4 \text{ in} = 0,1016 \text{ m}$

$$K = S \sqrt{2g} \tag{4.15}$$

$$K = \pi \left(\frac{0,1016 \text{ m}}{2} \right)^2 \sqrt{2 * 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$K = 0,036 \text{ m}^3/\text{s} = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$$

4.3.3. Ecuaciones de estado para los tres tanques

- **Tanque 1**

$$A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = q_i - q_1 \tag{4.16}$$

Donde:

- A_1 = Area 1
- $\frac{\partial h_1}{\partial t}$ = diferencial de la altura 1 respecto al tiempo
- q_i = caudal de ingreso
- q_1 = caudal de salida tanque 1

$$q_i = K_1 a_1 \tag{4.17}$$

Donde:

- K_1 = constante
- a_1 = Abertura de la válvula 1

$$q_1 = K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2} \tag{4.18}$$

Donde:

- K_2 = constante
- a_2 = Abertura de la válvula 1
- h_1 = altura 1
- h_2 = altura 2

reemplazando 2 y 3 en 1 se obtiene:

$$A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = K_1 a_1 - K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2}$$

- **Tanque 2**

$$A_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = q_1 - q_2 \quad (4.19)$$

Donde:

- $A_2 =$ Area 2
- $\frac{\partial h_2}{\partial t} =$ diferencial de la altura 2 respecto al tiempo
- $q_1 =$ caudal de salida del tanque 1 = caudal de ingreso tanque 2
- $q_2 =$ caudal de salida tanque 2

$$q_2 = K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3} \quad (4.20)$$

Donde:

- $K_3 =$ constante
- $A_3 =$ Abertura de la válvula 1
- $h_2 =$ altura 2
- $h_3 =$ altura 3

reemplazando 3 y 6 en 5 se obtiene:

$$A_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2} - K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3}$$

- **Tanque 3**

$$A_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = q_2 - q_0 \quad (4.21)$$

Donde:

- $A_3 =$ Area 3
- $\frac{\partial h_3}{\partial t} =$ diferencial de la altura 3 respecto al tiempo
- $q_2 =$ caudal de salida del tanque 2 = caudal de ingreso tanque 3
- $q_0 =$ caudal de salida tanque 3

$$q_3 = K_4 a_4 \sqrt{h_3} \quad (4.22)$$

Donde:

- $K_4 =$ constante
- $a_4 =$ Abertura de la válvula 1
- $h_3 =$ altura 3

reemplazando 6 y 9 en 8 se obtiene:

$$A_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3} - K_4 a_4 \sqrt{h_3}$$

4.3.4. Linealización del sistema no lineal de tres tanques en cascada

- **Punto de equilibrio.** - las derivadas en cada ecuación de estado es igual a cero

Tanque 1

$$\begin{aligned} q_i &= q_1 \\ K_1 a_1 &= K_2 a_2 \sqrt{h_{1S}} \\ h_{1S} &= \left(\frac{K_1 a_1}{K_2 a_2} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Tanque 2

$$\begin{aligned} q_1 &= q_2 \\ K_2 a_2 \sqrt{h_1} &= K_3 a_3 \sqrt{h_{2S}} \\ \sqrt{h_{2S}} &= \frac{K_2 a_2 \sqrt{h_1}}{K_3 a_3} \\ h_{2S} &= \frac{K_2^2 a_2^2 h_1}{(K_3 a_3)^2} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Tanque 3

$$\begin{aligned} q_2 &= q_0 \\ K_3 a_3 \sqrt{h_2} &= K_4 a_4 \sqrt{h_{3S}} \\ \sqrt{h_{3S}} &= \frac{K_3 a_3 \sqrt{h_2}}{K_4 a_4} \\ h_{3S} &= \frac{K_3^2 a_3^2 h_2}{(K_4 a_4)^2} \end{aligned} \quad (4.25)$$

4.3.5. Linealización del modelo matemático utilizando la matriz Jacobiana

La primera derivada de la serie de Taylor se conoce como la matriz Jacobiana

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x - a)^1 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!} (x - a)^n$$

Donde:

- $\frac{f'(a)}{1!} (x - a)^1 =$ Matriz Jacobiana

4.3.6. Modelo de matriz Jacobiana

Es una forma directa de obtener el sistema lineal en espacio de estados

$$f_1(h_{1-2}, h_{2-3}, h_3, a_1) = \frac{1}{A_1} (K_1 a_1 - K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2}) \quad (4.26)$$

$$f_2(h_{1-2}, h_{2-3}, h_3, a_1) = \frac{1}{A_2} (K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2} - K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3}) \quad (4.27)$$

$$f_3(h_{1-2}, h_{2-3}, h_3, a_1) = \frac{1}{A_3} (K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3} - K_4 a_4 \sqrt{h_3}) \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta h'_1 \\ \Delta h'_2 \\ \Delta h'_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta a_1} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta a_1} \end{bmatrix} \Delta a_1 \\ y &= [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Donde:

- $$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta h_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta h_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_{1-2}} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_{2-3}} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta h_3} \end{bmatrix} = \text{Matriz A}$$

- $$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta a_1} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta a_1} \end{bmatrix} = \text{Matriz B}$$

- $\frac{\partial f_n}{\partial \Delta h_{n1-n2}} = \text{Derivada parcial de la función n respecto a la Altura n1 menos altura n2}$

- $\frac{\partial f_n}{\partial \Delta h_3} = \text{Derivada parcial de la función n respecto a la Altura 3}$

- $\frac{\partial f_n}{\partial \Delta a_1} = \text{Derivada parcial de la función n respecto a: } a_1$

- $y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} = \text{Vector de salida}$

Tanque 1

$$A_1 \frac{\partial \Delta h_1}{\partial t} = K_1 \Delta a_1 - \frac{K_2 a_2 \Delta h_1}{2\sqrt{h_1 - h_2}}$$

$$\Delta h_1 = \frac{K_2 a_2}{2A_1 \sqrt{h_1 - h_2}} \Delta h_2 + \frac{K_1}{A_1} \Delta a_1$$

Tanque 2

$$A_2 \frac{\partial \Delta h_2}{\partial t} = \frac{K_2 a_2 \Delta h_1}{2\sqrt{h_1 - h_2}} - \frac{K_3 a_3 \Delta h_2}{2\sqrt{h_2 - h_3}}$$

$$\Delta h_2 = \frac{K_2 a_2}{2A_2 \sqrt{h_1 - h_2}} \Delta h_1 + \frac{K_3 a_3}{2A_2 \sqrt{h_2 - h_3}} \Delta h_2$$

Tanque 3

$$A_3 \frac{\partial \Delta h_3}{\partial t} = \frac{K_3 a_3 \Delta h_2}{2\sqrt{h_2 - h_3}} - \frac{K_4 a_4}{2\sqrt{h_3}}$$

$$\Delta h_3 = \frac{K_3 a_3}{2A_3 \sqrt{h_2 - h_3}} \Delta h_2 + \frac{K_4 a_4}{2A_3 \sqrt{h_3}} \Delta h_3$$

4.3.7. Matriz de espacio de estados del sistema de tres tanques en cascada

$$\begin{bmatrix} \Delta h'_1 \\ \Delta h'_2 \\ \Delta h'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{K_2 a_2}{2A_1 \sqrt{h_{1s} - h_{2s}}} & 0 & 0 \\ \frac{K_2 a_2}{2A_2 \sqrt{h_{1s} - h_{2s}}} & -\frac{K_3 a_3}{2A_2 \sqrt{h_{2s} - h_{3s}}} & 0 \\ 0 & \frac{K_3 a_3}{2A_3 \sqrt{h_{2s} - h_{3s}}} & -\frac{K_4 a_4}{2A_3 \sqrt{h_3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1/A_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta h_1$$

4.4. Metodología Experimental

La experimentación se desarrolla mediante un análisis a la curva de salida del sistema de control del modelo matemático aplicando a éste un control por retroalimentación y un control PID; además se expone la forma de incluir un objeto tecnológico “PID_compact” en el algoritmo de control que va a ser realizado por el autómatas y un ejemplo de realización de un proyecto del tipo VI (instrumento virtual).

- **Modelo matemático**

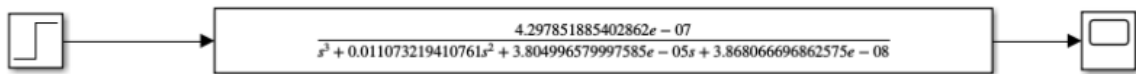


Figura 4.6. Diagrama de control del modelo matemático

Fuente: [Investigador]

- **Modelo matemático con retroalimentación unitaria**

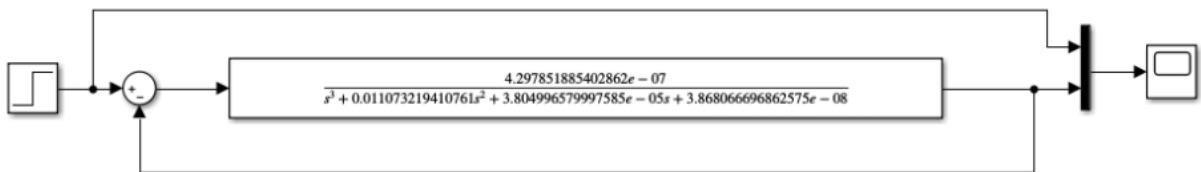


Figura 4.7. Diagrama de control del modelo matemático con retroalimentación unitaria

Fuente: [Investigador]

- **Modelo matemático con sistema de control PID**

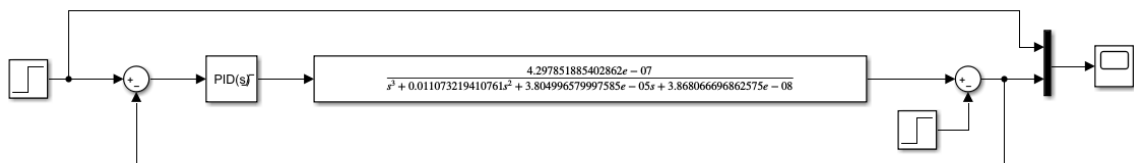


Figura 4.8. Diagrama de control del modelo matemático con sistema de control PID

Fuente: [Investigador]

- **Modelo de sistema de control PID para cada tanque**

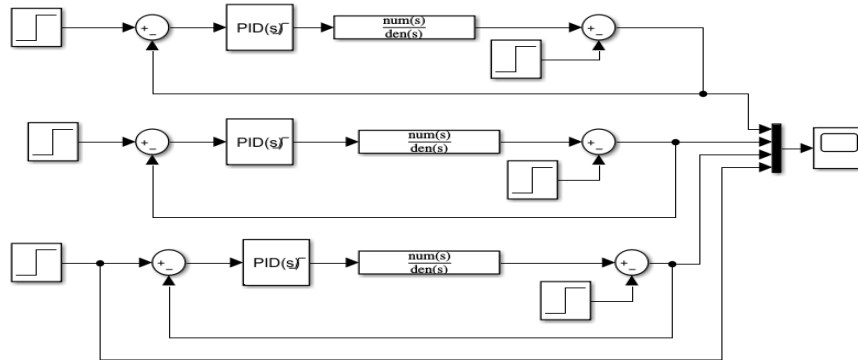


Figura 4.9. Diagrama de control del proceso de tres tanques con sistema de control PID
Fuente: [Investigador]

4.4.1. Configuración del objeto tecnológico regulador PID

Los bloques para el regulador PID se crean en un bloque de organización nuevo. Como nuevo bloque de organización se utiliza un bloque de organización de alarma cíclica. Los bloques de organización de alarma cíclica sirven para iniciar programas en intervalos periódicos, independientemente de la ejecución cíclica del programa. La ejecución cíclica del programa es interrumpida por el OB de alarma cíclica y continúa después de éste. [25]

- **Paso 1:** Crear un OB de alarma cíclica. Asegurarse que la casilla de verificación "Agregar y abrir" esté activada.

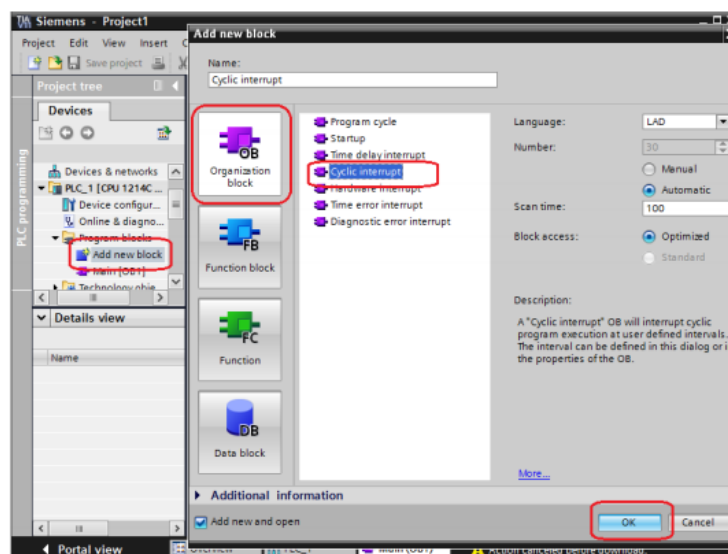


Figura 4.10. Adición de bloque organizacional cíclico
Fuente: [25]

El OB de alarma cíclica creado se abre en la vista del proyecto del editor de programas. Si el bloque no se abre automáticamente es porque no se ha activado la casilla de verificación "Agregar y abrir" en el cuadro de diálogo.

En este caso, se cambia a la vista del proyecto y se abre el bloque de programa en el árbol del proyecto.

- **Paso 2:** Crear el objeto tecnológico "PID_Compact" en un segmento del bloque de organización cíclico.

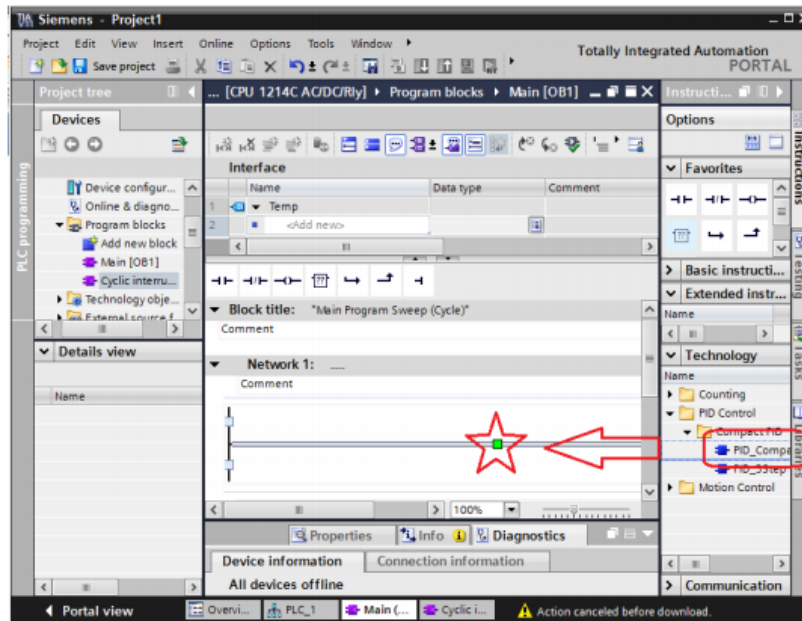


Figura 4.11. Agregar objeto PID

Fuente: [25]

- **Paso 3:** Confirmar la creación del bloque de datos para el objeto tecnológico "PID_Compact".

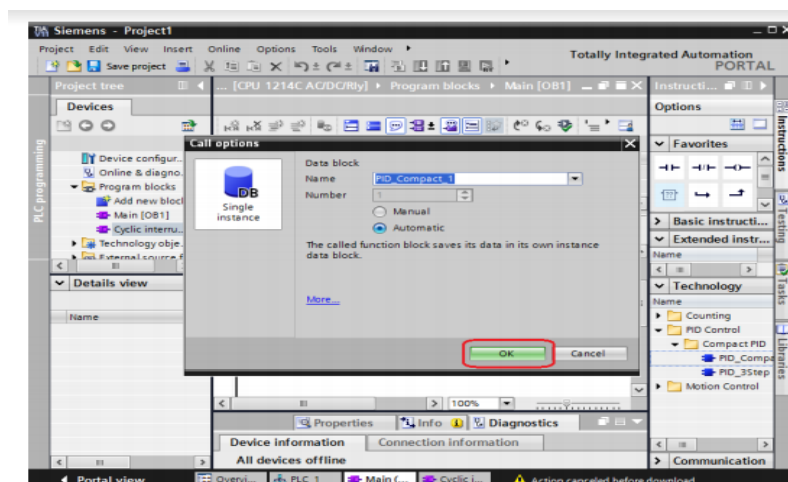


Figura 4.12. Bloque de datos para el objeto tecnológico PID

Fuente: [25]

Se ha programado la llamada del objeto tecnológico "PID_Compact" en el OB de alarma cíclica y se ha creado el bloque de datos "PID_Compact_DB". Para configurar el objeto tecnológico "PID_Compact" e interconectarlo con el proceso debe configurarse e interconectar las variables.

- **Paso 4:** Asignar las variables de los distintos datos que requiere el objeto tecnológico para ejecutar las funciones de control.

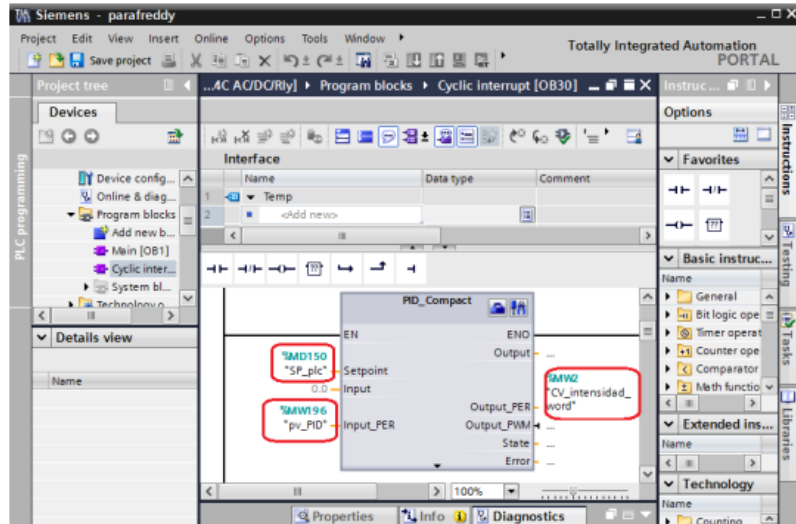


Figura 4.13. Edición de parámetro de objeto PID Compact
Fuente: [25]

4.4.2. Creación de un instrumento virtual (VI)

Cuando se inserta un objeto en el panel frontal, se crea una terminal en el diagrama de bloques; las cuales tienen dirección a los objetos del panel frontal con el algoritmo. Cada terminal sujeta información con referencia al objeto que corresponde. Por ejemplo, el color y el símbolo suministran la información acerca del tipo de dato.

Los terminales de los controladores tienen una flecha al lado derecho y tienen además un borde grueso, los indicadores tienen una flecha del lado izquierdo y un borde fino.

Una regla lógica puede ser aplicada al momento de cablear en LabVIEW; cada cable debe tener una fuente o y cada cable puede tener varios indicadores [15]

El VI que creado adquiere una señal de onda cuadrada de 10Vp-p, además de las terminales del panel frontal, el diagrama de bloques sujeta sus propias funciones para programar el vi como puede ser el "DAQ Assistant", funciones para sumar, restar, multiplicar, sacar coeficientes, realizar transformadas rápidas de Fourier, integrar, etc.

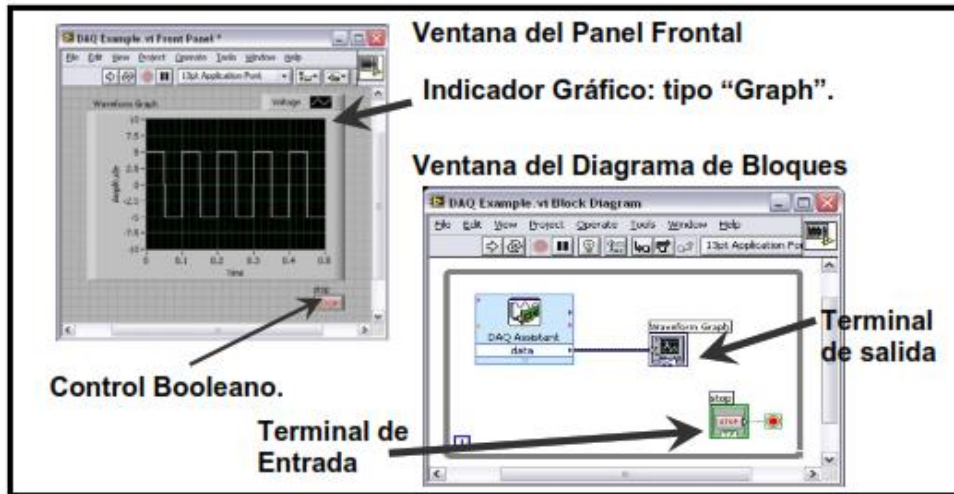


Figura 4.14. Demostración de la creación de un instrumento virtual VI
Fuente: [15]

5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Modelamiento Matemático

Tabla 5.1. Respuestas de cálculos y análisis matemáticos para el sistema

ITEM	FORMULA N°	RESPUESTA
Velocidad	(4.12)	$v = 1,43 \text{ cm/s} = 0,0143 \text{ m/s}$
Área	(4.13)	$A_{\emptyset} = 1,77 \text{ m}^2 = A1 = A2 = A3$
Caudal	(4.14)	$Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$
Constante Válvulas	(4.15)	$K = 0,036 \text{ m}^3/\text{s} = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$
Ecuación de estado Tanque 1	(4.18)	$A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = K_1 a_1 - K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2}$
Ecuación de estado Tanque 2	(4.20)	$A_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = K_2 a_2 \sqrt{h_1 - h_2} - K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3}$
Ecuación de estado Tanque 3	(4.22)	$A_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = K_3 a_3 \sqrt{h_2 - h_3} - K_4 a_4 \sqrt{h_3}$
Punto de Equilibrio tanque 1	(4.23)	$h_{1S} = \left(\frac{K_1 a_1}{K_2 a_2}\right)^2$
Punto de Equilibrio tanque 2	(4.24)	$h_{2S} = \frac{K_2^2 a_2^2 h_1}{(K_3 a_3)^2}$
Punto de Equilibrio tanque 3	(4.25)	$h_{3S} = \frac{K_3^2 a_3^2 h_2}{(K_4 a_4)^2}$

Δh_1	(4.26)	$\Delta h_1 = \frac{K_2 a_2}{2A_1 \sqrt{h_1 - h_2}} \Delta h_2 + \frac{K_1}{A_1} \Delta a_1$
Δh_2	(4.27)	$\Delta h_2 = \frac{K_2 a_2}{2A_2 \sqrt{h_1 - h_2}} \Delta h_2 + \frac{K_3 a_3}{2A_2 \sqrt{h_2 - h_3}} \Delta h_2$
Δh_3	(4.28)	$\Delta h_3 = \frac{K_3 a_3}{2A_3 \sqrt{h_2 - h_3}} \Delta h_2 + \frac{K_4 a_4}{2A_3 \sqrt{h_3}} \Delta h_3$
Matriz Jacobiana	(4.29)	$\begin{bmatrix} \Delta h'_1 \\ \Delta h'_2 \\ \Delta h'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{K_2 a_2}{2A_1 \sqrt{h_{1s} - h_{2s}}} & 0 & 0 \\ \frac{K_2 a_2}{2A_2 \sqrt{h_{1s} - h_{2s}}} & -\frac{K_3 a_3}{2A_2 \sqrt{h_{2s} - h_{3s}}} & 0 \\ 0 & \frac{K_3 a_3}{2A_3 \sqrt{h_{2s} - h_{3s}}} & -\frac{K_4 a_4}{2A_3 \sqrt{h_3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1/A_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta h_1$

Fuente: [Investigador]

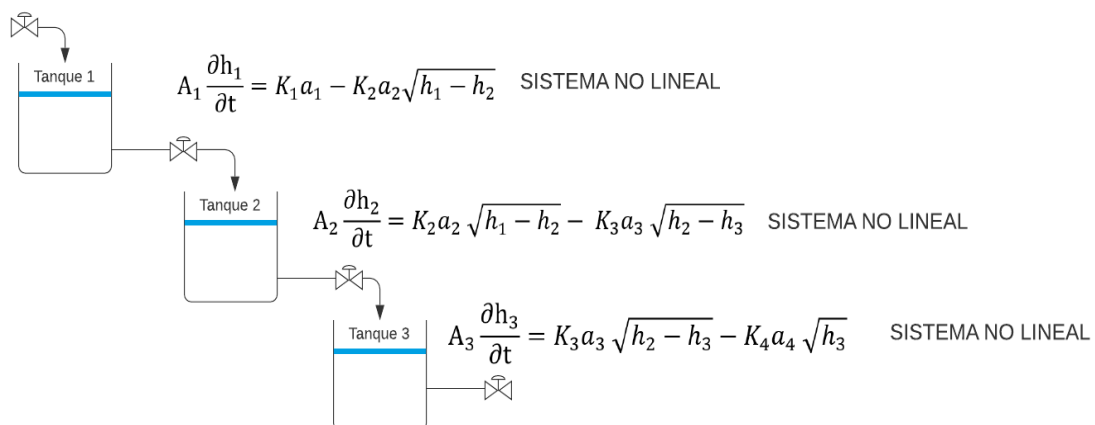


Figura 5.1. Ecuación de estado para cada Tanque

Fuente: [Investigador]

5.1.1. Función de transferencia Obtenida

$$G = \frac{4.298e-07}{s^3 + 0.01107 s^2 + 3.805e-05 s + 3.868e-08}$$

Continuous-time transfer function.

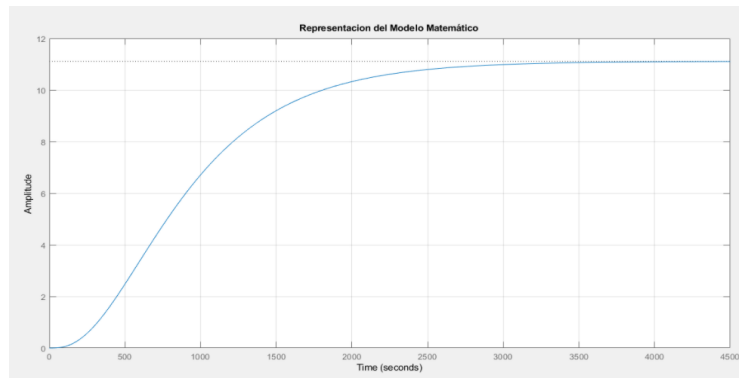


Figura 5.2. Respuesta de la función de Transferencia
Fuente: [Investigador]

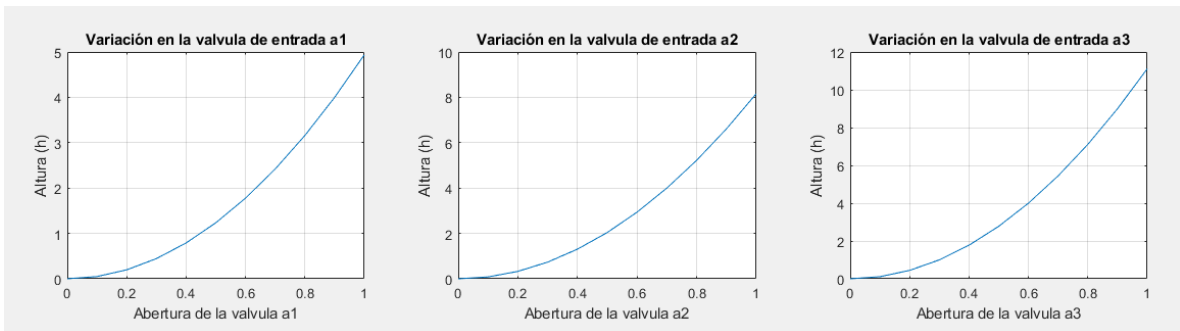


Figura 5.3. Respuestas de apertura de las válvulas para los tres tanques para el llenado de cada tanque
Fuente: [Investigador]

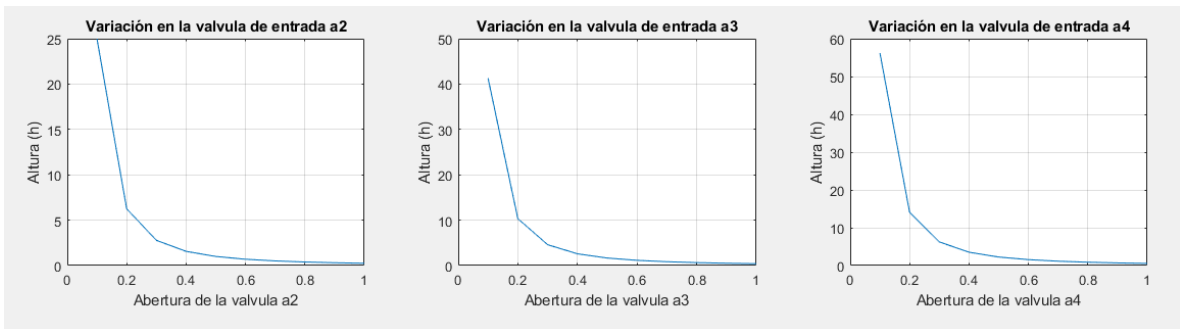


Figura 5.4. Respuestas de apertura de las válvulas para los tres tanques para el vaciado de cada tanque
Fuente: [Investigador]

5.1.2. Respuestas de los sistemas de control experimentales

- **Modelo Matemático:** El sistema de control se puede ver en la fig. 4.6.

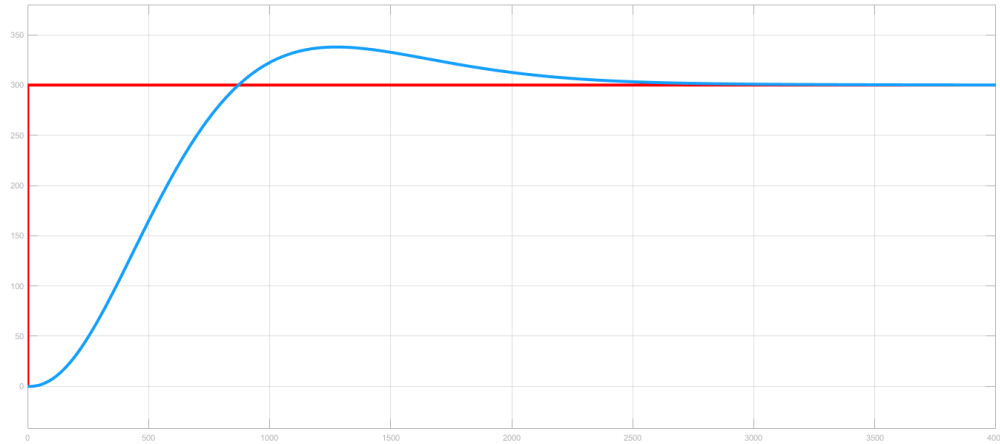


Figura 5.5. Respuesta del modelo matemático
Fuente: [Investigador]

- **Modelo matemático con retroalimentación unitaria:** El sistema de control se puede ver en la fig. 4.7.

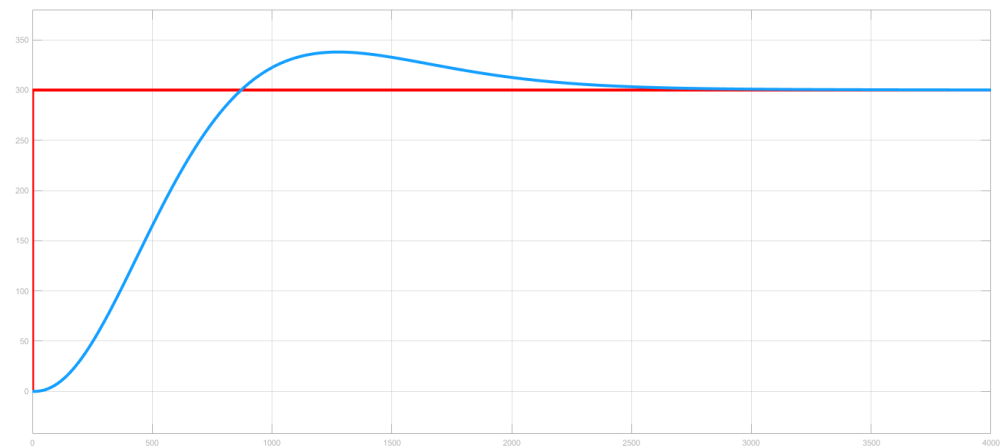


Figura 5.6. Respuesta del modelo matemático con retroalimentación
Fuente: [Investigador]

- **Modelo matemático con sistema de control PID:** El sistema de control se puede ver en la fig. 4.8.

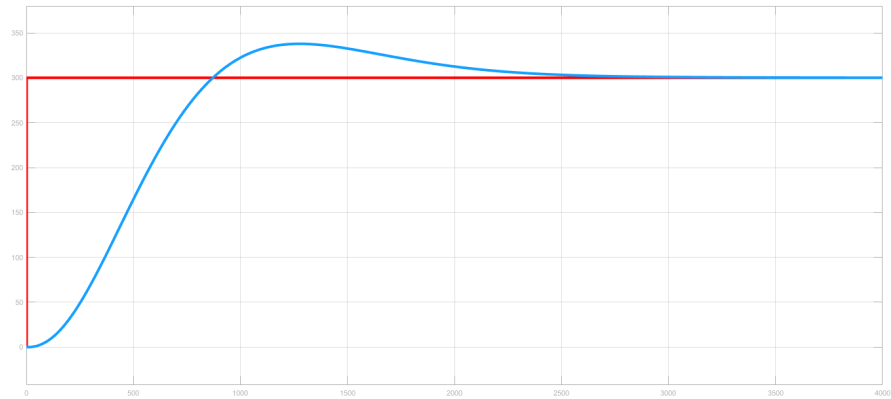


Figura 5.7. Respuesta del modelo matemático con controlador PID
Fuente: [Investigador]

- **Modelo de sistema de control PID para cada tanque:** El sistema de control se puede ver en la fig. 4.9.

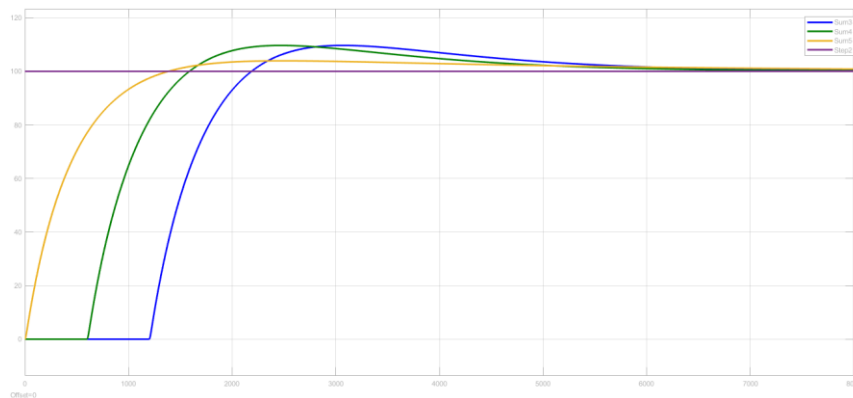


Figura 5.8. Respuesta del sistema de tres tanques en cascada con controlador PID individual
Fuente: [Investigador]

5.2. Parámetros de sintonización de los controladores PID

Estos valores son obtenidos a través de la herramienta de simulink y su función denominada autotuning que utiliza el método de Ziegler-Nichols que permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema. (ver ANEXO 03, ANEXO 04, ANEXO 05,)

Tabla 5.2. Parámetros de sintonización de los PID

TANQUE N°	PROPORCIONAL	INTEGRAL	DERIVATIVO
1	12.64	0.6153	1.264
2	12.64	0.56078	1.264
3	12.64	0.62481	1.264

Fuente: [Investigador]

5.3. Ejemplo práctico

- Para un set point de los tres tanques correspondientemente de:
 - Tanque 1 = 151
 - Tanque 2 = 149
 - Tanque 3 = 151
- El porcentaje de apertura de la válvula de perturbación = 50 % (ver ANEXO 01)

Se presenta la estabilización de la variable de proceso con respecto al set point para cada tanque correspondiente; ninguna PV presenta sobre impulsos respecto a SP.

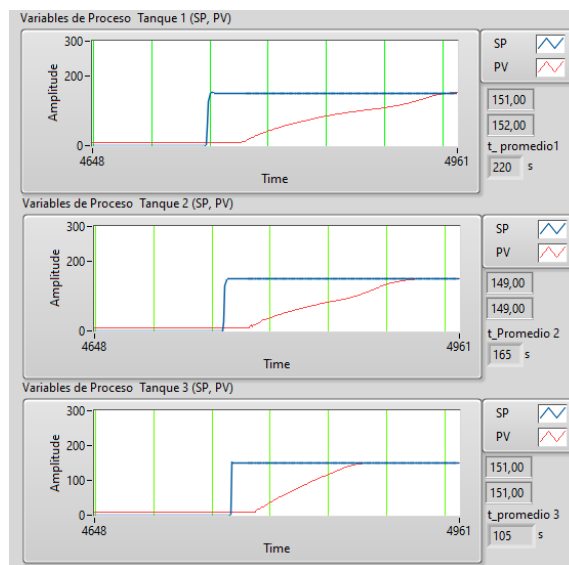


Figura 5.9. Respuesta de estabilización sin sobreimpulsos

Fuente: [Investigador]

Mediante una observación en la gráfica de respuestas del sistema se puede apreciar que el tanque 3 es el primero en estabilizarse, seguido del tanque 2 y 1 correspondientemente; a continuación, se presenta el análisis para calcular el tiempo de estabilización de cada tanque.

- **Tanque 1**

En la fig. 5.9 se puede determinar que el tiempo en que inicia la orden de aumentar el nivel del tanque 1 es a los 4743 seg.

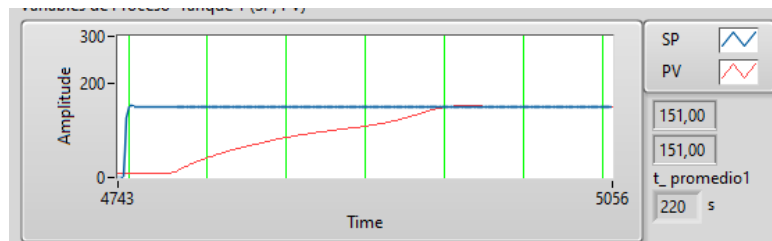


Figura 5.10. Curvas SP y PV para el tanque 1

Fuente: [Investigador]

Se observa en la fig. 5.10 que la curva que representa al PV alcanza el valor del SP a los 4927 seg. por lo que se determina que el tanque número 1 para este caso de ejemplo se estabilizó en un rango de 184 seg. y no presentó sobreimpulsos.

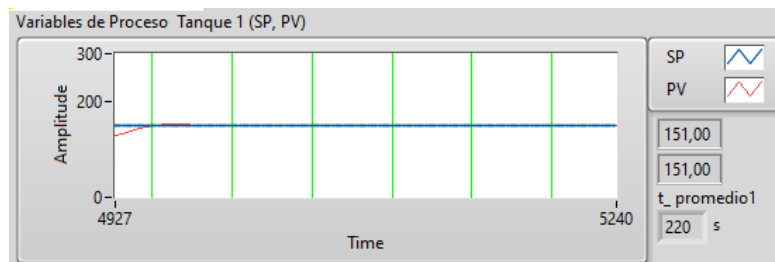


Figura 5.11. Tiempo de estabilización del tanque 1

Fuente: [Investigador]

La variable de control presenta un salto hasta su máximo valor lo que presenta que la apertura de la válvula está abierta en su totalidad hasta que se estabiliza y presenta un valor de 50,29 %; es decir la señal de controlador se mantiene en 5 voltios aproximadamente para conservar el nivel en el valor deseado bajo las mismas condiciones.

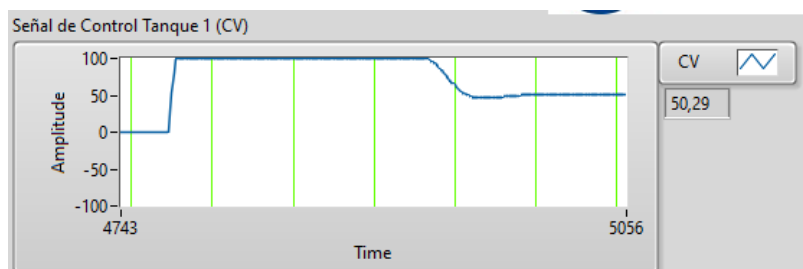


Figura 5.12. Comportamiento de la variable de control para el tanque 1

Fuente: [Investigador]

El mismo proceso se repite para determinar el tiempo de estabilización en la variable de nivel para el tanque 2 y 3

- **Tanque 2**

Se puede observar que la orden de aumentar el nivel en el tanque 2 inicia a los 4757 seg.

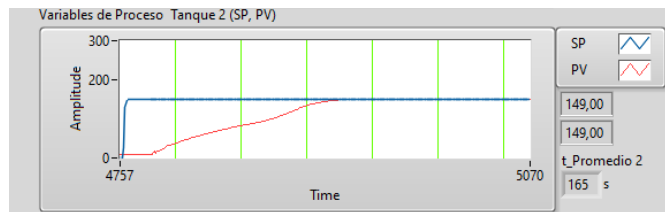


Figura 5.13. Curvas SP y PV para el tanque 2
Fuente: [Investigador]

Se observa en la fig. 5.13 que la curva que representa al PV alcanza el valor del SP a los 4898 seg por lo que se determina que el tanque número 2 para este caso de ejemplo se estabilizo en un rango de 141 seg y no presento sobre impulsos.

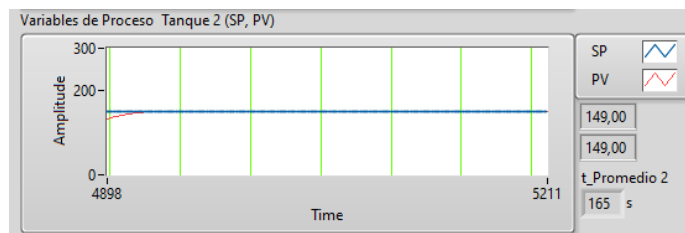


Figura 5.14. Tiempo de estabilización del tanque 2
Fuente: [Investigador]

La variable de control presenta un salto hasta su máximo valor lo que presenta que la apertura de la válvula está abierta en su totalidad hasta que se estabiliza y presenta un valor de 50,05 %; es decir la señal de controlador se mantiene en 5 voltios aproximadamente para conservar el nivel en el valor deseado bajo las mismas condiciones.

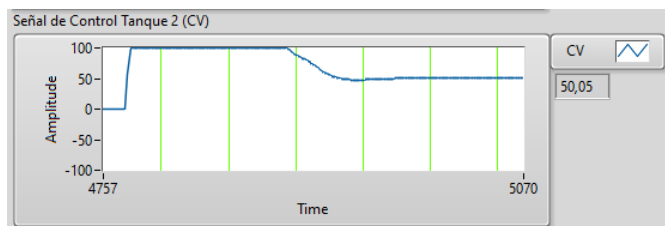


Figura 5.15. Comportamiento de la variable de control para el tanque 2
Fuente: [Investigador]

- **Tanque 3**

Se puede observar que la orden de aumentar el nivel en el tanque 3 inicia a los 4764 seg.

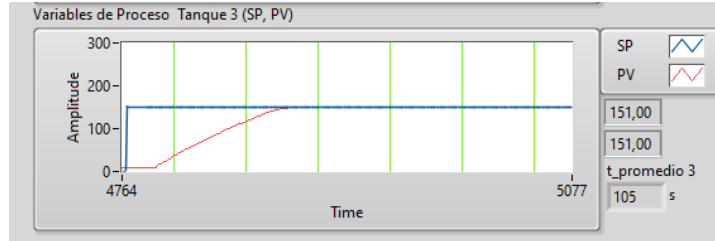


Figura 5.16. Curvas SP y PV para el tanque 2
Fuente: [Investigador]

Se observa en la fig. 5.16 que la curva que representa al PV alcanza el valor del SP a los 4859 seg por lo que se determina que el tanque número 3 para este caso de ejemplo se estabilizó en un rango de 95 seg y no presentó sobreimpulsos.

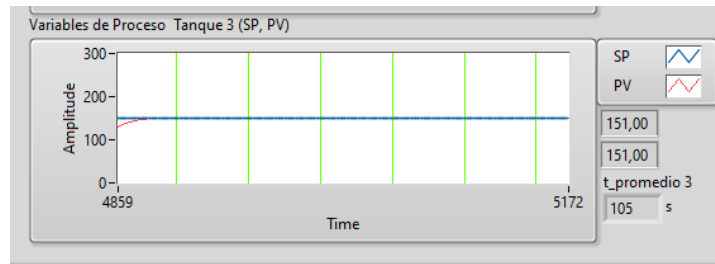


Figura 5.17. Tiempo de estabilización del tanque 2
Fuente: [Investigador]

La variable de control presenta un salto hasta su máximo valor lo que presenta que la apertura de la válvula está abierta en su totalidad hasta que se estabiliza y presenta un valor de 50,15 %; es decir la señal de controlador se mantiene en 5 voltios aproximadamente para conservar el nivel en el valor deseado bajo las mismas condiciones.

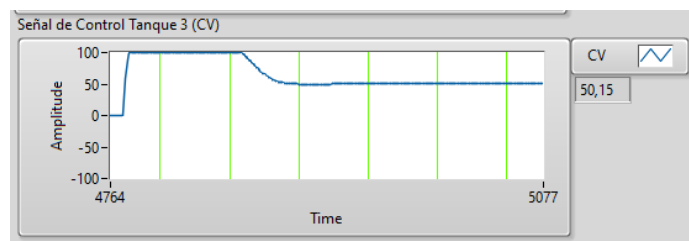


Figura 5.18. Comportamiento de la variable de control para el tanque 3
Fuente: [Investigador]

El registro de estos datos de este caso de ejemplo se obtuvo en una hoja de cálculo de Excel (ver ANEXO 13)

6. PRESUPUESTO Y ANALISIS DE IMPACTOS

6.1. Presupuesto

Para realizar el cálculo del presupuesto del proyecto se ha tomado en cuenta costos directos e indirectos.

6.1.2. Materiales tecnológicos

Debido a que el proyecto se basa en softwares de simulación y programación los costos serán netamente tecnológicos que son los que nos permiten la automatización control y monitoreo del proyecto

Tabla 6.1. Presupuestos materiales tecnológicos

ELEMENTOS TECNOLOGICOS				
Cantidad	Unidad	Elemento	Costo p/u (\$)	Costo total (\$)
1		Computador portátil core i5	500,00	500,00
3		Licencias de Software	600,00	600,00
TOTAL				\$ 1100,00

Fuente: [Investigador]

Tabla 6.2. Costos directos e indirectos

COSTOS DIRECTOS	
Componente del gasto	Costo total (\$)
Elementos tecnológicos	\$1100.00
TOTAL COSTOS DIRECTOS	\$ 1100,00
COSTOS INDIRECTOS	
Transporte	20,00
Tutoría de programación	200,00
Otros	20,00
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	\$240,00
TOTAL COSTOS	\$1340,00

Fuente: [Investigador]

6.2. Análisis de impactos

6.2.1. Impacto práctico

La implementación de la simulación en un laboratorio virtual permitirá fortalecer los conocimientos teóricos impartidos durante el proceso de formación académica, ya que permite la realización de prácticas en un ambiente virtual que no solo permite la visualización de las variables a controlar sino también hace accesible al estudiante herramientas tecnológicas que no van a ser susceptibles a accidentes.

6.2.2. Impacto tecnológico

Los proyectos de simulación son de gran impacto tecnológico ya que brindan la oportunidad de conocer los diferentes softwares que existen en el ámbito industrial y que son el auge de los procesos industriales, además despiertan inquietudes nuevas en los estudiantes que las lleva a la investigación de nuevas formas de simular procesos o controlar variables de manera remota y adaptarlos a procesos sujetos a estudios y análisis por parte de los estudiantes; La creación de espacios virtuales facilitan la comprensión de ciertos temas sin el acceso a laboratorios físicos.

6.2.3. Impacto epistemológico

Las implementaciones de procesos industriales simulados facilitan la comprensión de asignaturas como control industrial, control autómatas programables, sistemas de control, Instrumentación, Automatización industrial; entre otros que son de gran importancia en el proceso de formación académica de un ingeniero electromecánico ya que estas asignaturas abren un campo extenso a la programación, control y monitoreo de procesos que son de vital importancia en la vida profesional tanto para su aplicación en el campo laboral y además aportan al crecimiento personal de cada profesional.

7. CONCLUSIONES

- Se puede concluir que, mediante la investigación realizada; se estableció una secuencia a seguir para obtener el modelo matemático de la planta; además se determinó que en la industria metalúrgica existen sistemas que involucran depósitos en cascada lo que hace relevante el estudio del control de nivel para este tipo de procesos.
- Se puede concluir que, el script para los controladores PID responden a un sistema de control en lazo cerrado individual para cada tanque lo que hace posible que el proceso de tres tanques en cascada se mantenga estable, independientemente del valor que el usuario ajuste en la perturbación.
- Se puede concluir que, mediante el análisis matemático realizado y con la ayuda de un programa especializado se obtuvo la función de transferencia y los valores de sintonización de los controladores; así mismo, por medio de Software's específicos se consiguió controlar el nivel del proceso a través de una aplicación SCADA y simularlo en un ambiente virtual.
- Se puede concluir que, mediante pruebas realizadas en el sistema el tiempo promedio de estabilización para el tanque 1, es de 220 seg, para el tanque 2 es de 165 seg, y para el tanque 3, es de 105 seg; con un porcentaje de entre 50% y 60% en la apertura de la válvula de perturbación y en cada caso no se presentan sobre impulsos en las variables del proceso con respecto al valor de referencia.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, en caso de profundizar el tema desarrollado por medio de la creación de módulos u otros métodos se considere las medidas determinadas en este estudio ya que son de vital importancia para que el sistema tenga un comportamiento estable.
- Se recomienda que, el usuario del sistema sea capaz de identificar las variables que afectan al proceso, teniendo en cuenta que lo que se quiere en este proyecto es desarrollar una metodología de identificación y entrenamiento aplicables en la práctica.
- Se recomienda que, se debe valorar la posibilidad de realizar cambios en los algoritmos planteados en este trabajo para tener un enfoque distinto en la variable de interés, además se puede aumentar el número de perturbaciones que afecten al sistema.
- Se recomienda que, este proyecto puede ser aprovechado al máximo tanto por estudiantes como herramienta de entrenamiento no solamente en función de las variables inmersas en el proceso sino también en otras áreas como pueden ser: redes de comunicación, diseño de sistemas de adquisición y control de datos, entre otros; así mismo puede ser utilizado por docentes en el diseño de estrategias pedagógicas.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Ogata, Ingeniería de control moderno, 3a ed. México: Ed Pearson, 1998.
- [2] L. Corrales, “Interfaces de comunicación Industrial”, Dpto. de automatización y control Industrial, EPN 2007.
- [3] E. Pérez “Los sistemas SCADA en la automatización Industrial”, Tecnología en marcha, Vol 28, N°4, Costa Rica, 2015.
- [4] M. Redondo, “Diseño e implantación de un sistema SCADA para una planta de producción y envasado de líquidos”, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, 2008.
- [5] C. Smith, A. Corripio, “Control Automático de procesos” Ed. Limusa. Primera edición, Tercera reimpresión, 1996
- [6] A. Espinosa, “Sistema de control para la sincronización de velocidad en el proceso de solidificación continua del acero en la planta de acería de la empresa NOVACERO S.A.”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, UTA, Ambato, Ecuador, 2019, Disponible en:
https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/29138/1/Tesis_%20t1520masc.pdf
- [7] J. Poma, R. Tello, E. Ruiz, “Diseño de una estación virtual para el control de las perturbaciones que afectan la temperatura de los procesos industriales”, Redalyc, datos industriales, 2007. [En línea]. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81610106>
- [8] A. Sandoval, “Sistema de control de nivel aplicando un PID en un modelo de distribuidor de colada continua”, IPN, Escuela Superior de ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, D.F., 2019 Disponible en:
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3937/SISTEMADECONTROL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] Primeros Pasos Simatic TIA Portal - Step 7 Basic V10.5, Siemens AG, Alemania, 04/2009.
- [10] Revista ELECTROINDUSTRIA, “La puerta de entrada a la automatización de la Empresa Digital”, 2016. [En línea]. Disponible en:
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2857&tip=7.&xit=tia-portal-v14-de-siemens-la-puerta-de-entrada-a-la-automatizacion-de-la-empresa-digital#:~:text=En%20el%20campo%20de%20ingenier%C3%ADa,automatizaci%C3%B3n%20en%20la%20Empresa%20Digital.&text=Todo%20esto%20hace%20de%20TIA,funciones%20para%20los%20procesos%20digitales.>

- [11] V. del Barrio, “Diseño y programación de varias estaciones de trabajo mediante el uso de PLC y softwares específicos,” Universidad de Valladolid, 2017
- [12] Documentación didáctica, Módulo TIA Portal 031-100, edición 2018 Digital Factory, DF FA, [En línea]. Disponible en: <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/basics-programming-s7-1200/sce-031-100-fc-programming-s7-1200-r1709-es.pdf>
- [13] Manual básico de LabVIEW de Masterhacks, Primera edición, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://renovablesconsaburum.files.wordpress.com/2015/09/manual-bc3a1sico-de-programac3b3n-en-labview-por-masterhacks.pdf>
- [14] Introducción a LabVIEW, National Instruments,2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/>
- [15] E. lojan, D. Iñiguez, “Diseño de un sistema HMI/SCADA para una planta de clasificación con visión artificial” Universidad del Azuay, Ecuador, 2009 [En línea]. Disponible en: <http://201.159.222.99/bitstream/datos/258/1/07542.pdf>
- [16] MaterPLC, “Simulación de SCADA y PLCSIM con NetToPLCsim”, [En línea]. Disponible en: <https://masterplc.com/descargar/nettoplcsim/> consultado en: Enero, 12, 2021.
- [17] Real Games, “Factory I/O”,2021, [En línea]. Disponible en: <https://docs.factoryio.com/>
- [18]National Istruments, “Servidores OPC”, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.opc-servers.html#305861>
- [19]National Istruments “complementos para adquisicion de datos y control”, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/shop/software/products/labview-datalogging-and-supervisory-control-module.html>
- [20] IONOS “TCP/IP: el protocolo que hace posible Internet”,2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/tcpip/>
- [21] A. Aranda, “metodología de la simulación ”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/angelicaarandacastillo/metodologia-de-la-simulacion>
- [22] A. Piñon, “CONFIGURACIÓN NI OPC SERVER”, Laboratorio de Control Lógico y Redes Industriales,2012, [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/11531996/Configuracion_NI_OPC_Server

- [23] I. Pazmiño, N. Rodríguez, “Diseño de un controlador PID con comunicación inalámbrica para una planta de 3 tanques”, ESPOL, Guayaquil,2017.
- [24] D. Fernández, “Simulación y Diagnóstico de una Instalación Industrial mediante Factory I/O y OPC”, Universidad de Valladolid, 2017.
- [25]F. Cuji. “Diseño e implementación de un módulo didáctico para el monitoreo y control automático de un sistema de temperatura de un horno para el laboratorio de redes industriales y control de procesos de la escuela politécnica del ejército extensión latacunga”, Departamento de eléctrica y electrónica,2014.
- [26] Sandoval, Normas Isa y Sama, 2014. [En línea]. Disponible en:
<http://Prezzi.com/Igkqqqup20ok/Normas-Isa-Y-Sama/>

ANEXOS

ANEXO 01

Set points para cada tanque y porcentaje de apertura de la válvula de perturbación para el caso del ejemplo



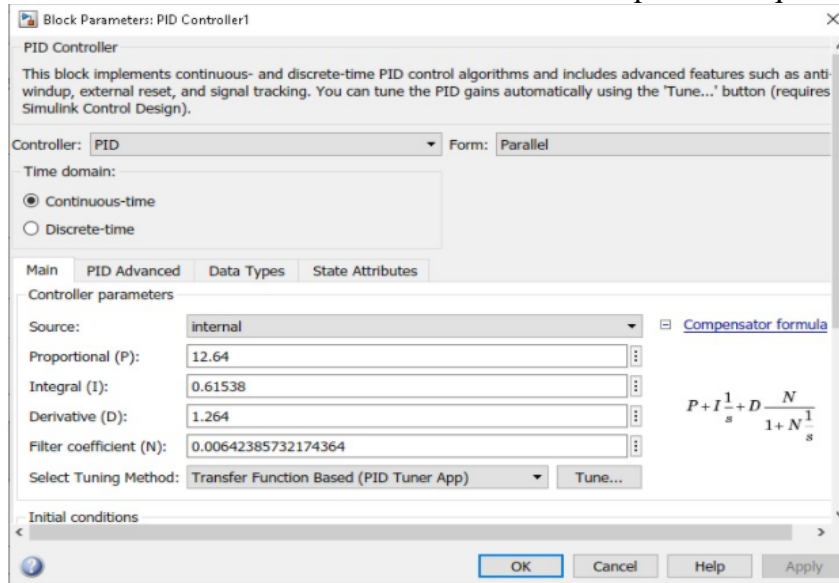
ANEXO 02

Conexión de entrada y salida del PLC

Start	I0.0	Q0.0	Indicador_Encendido
Stop	I0.1	Q0.1	Start Indicador (Light)
Manual (State 0)	I0.2	Q0.2	Stop Indicador (Light)
Emergency Stop	I0.3	Q0.3	V1_Tanque1_Indicador (Light)
FACTORY I/O (Running)	I0.4	Q0.4	V2_Tanque2_Indicador (Light)
V1_Tanque1	I0.5	Q0.5	V3_Tanque3_Indicador (Light)
V2_Tanque2	I0.6	Q0.6	
V3_Tanque3	I0.7	Q0.7	
Setpoint 1 (V)	IW10 (INT)	(INT) QW10	Tank 1 (Fill Valve)
Tank 1 (Level Meter)	IW12 (INT)	(INT) QW12	Tank 1 (Discharge Valve)
Setpoint 2 (V)	IW14 (INT)	(INT) QW14	Tank 2 (Fill Valve)
Tank 2 (Level Meter)	IW16 (INT)	(INT) QW16	Tank 2 (Discharge Valve)
Setpoint 3 (V)	IW18 (INT)	(INT) QW18	Tank 3 (Fill Valve)
Tank 3 (Level Meter)	IW20 (INT)	(INT) QW20	Tank 3 (Discharge Valve)
Tank 1 (Flow Meter)	IW22 (INT)	(INT) QW22	PV1
Tank 2 (Flow Meter)	IW24 (INT)	(INT) QW24	PV2
Tank 3 (Flow Meter)	IW26 (INT)	(INT) QW26	PV3
		(INT) QW28	SP1
		(INT) QW30	SP2
		(INT) QW32	SP3

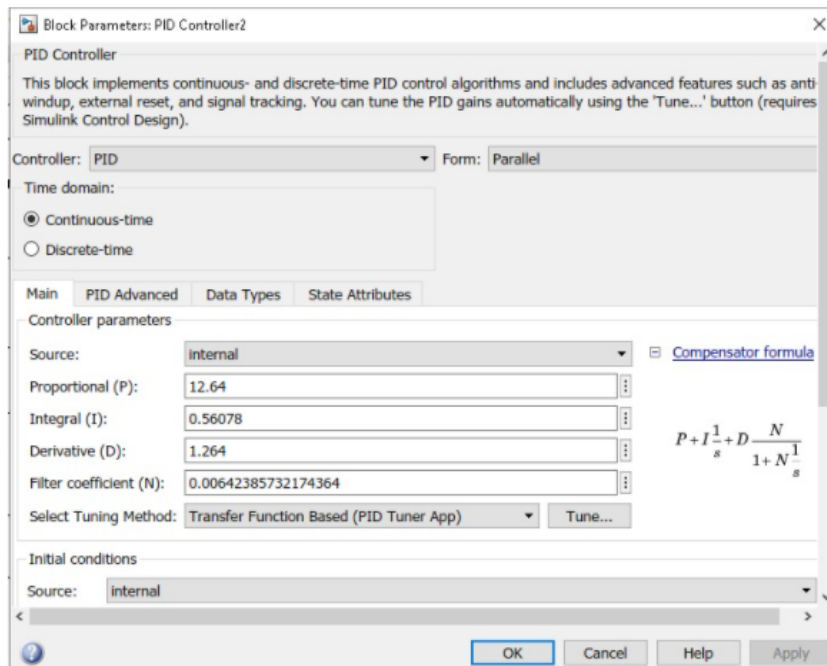
ANEXO 03

Parámetros de sintonización de los PID obtenidos en Simulink para el tanque 1



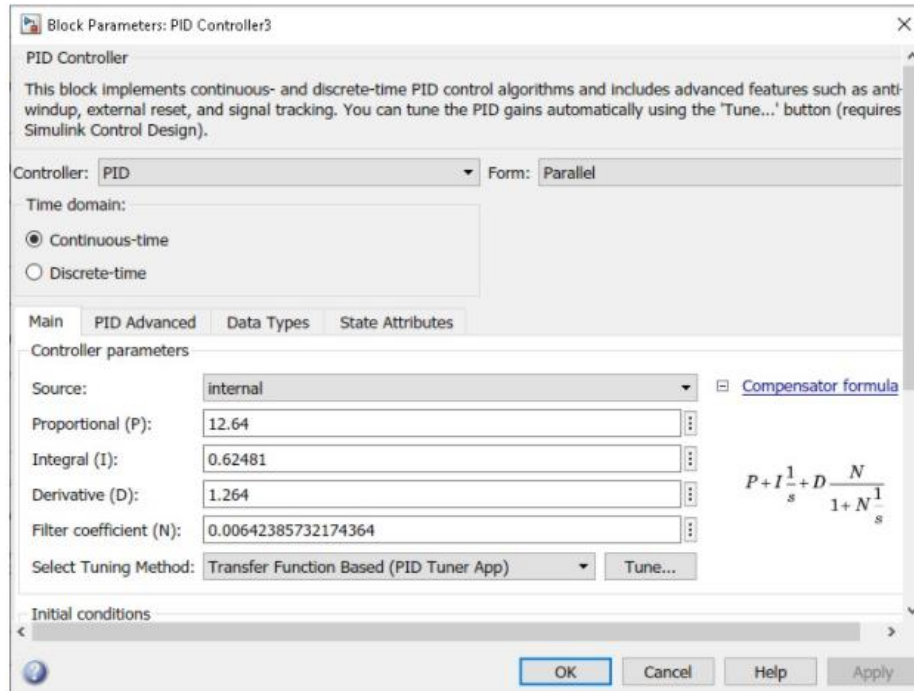
ANEXO 04

Parámetros de sintonización de los PID obtenidos en Simulink para el tanque 2



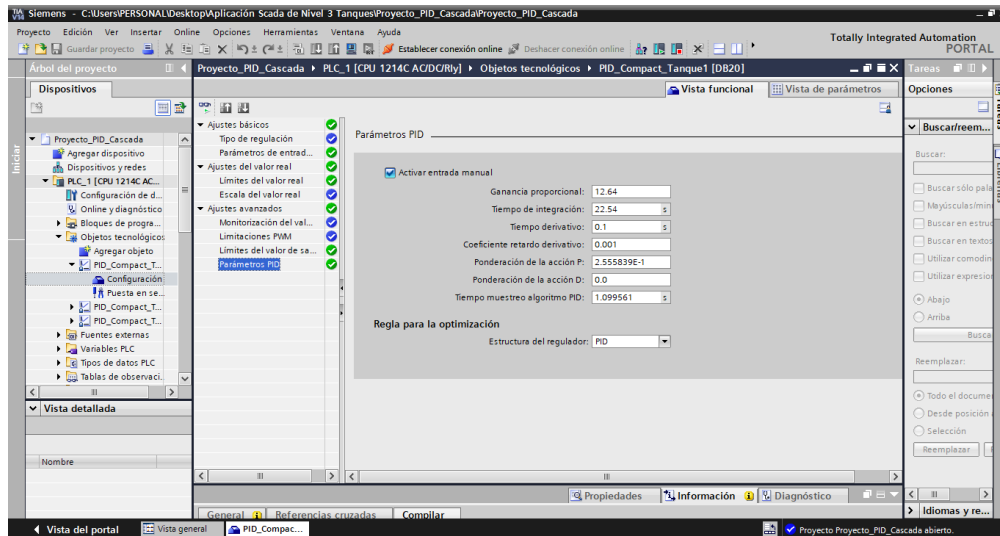
ANEXO 05

Parámetros de sintonización de los PID obtenidos en Simulink para el tanque 3



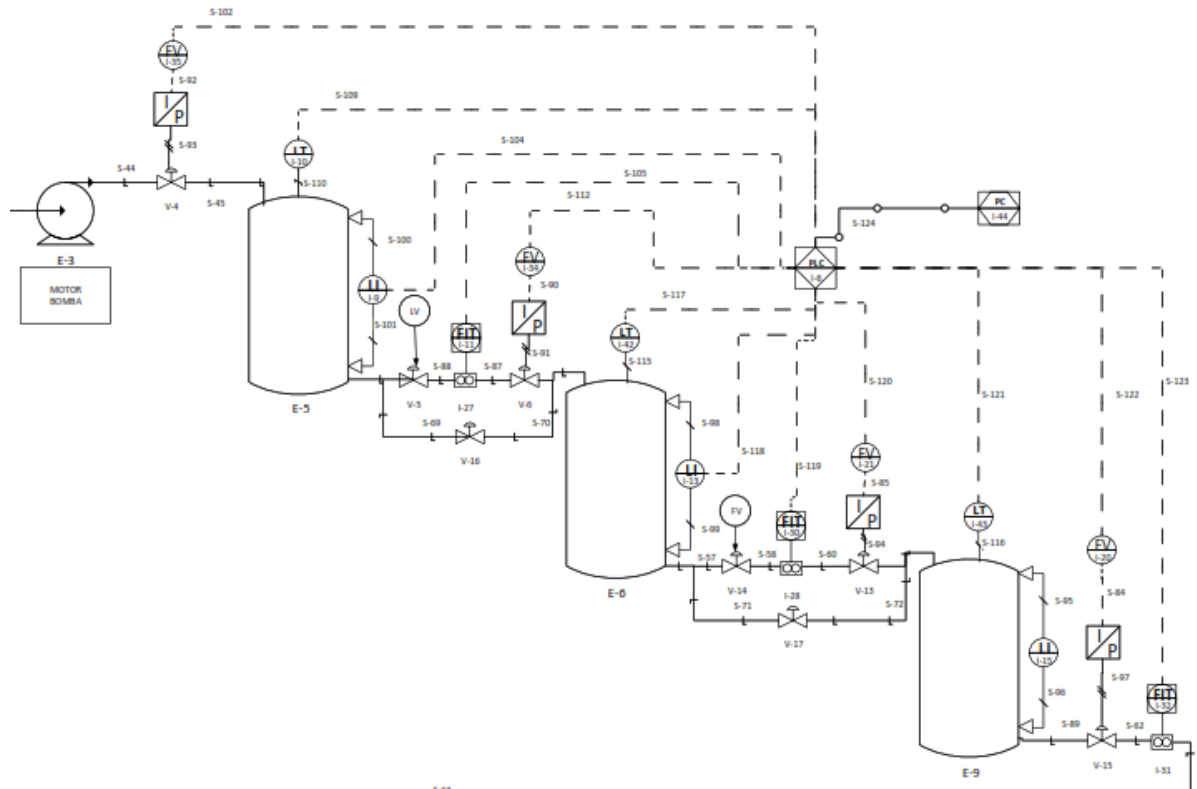
ANEXO 06

Parámetros del controlador PID en TIA Portal



ANEXO 07

Diagrama P&ID de la planta simulada



ANEXO 08

Tabla de variables del PLC

Name	Path	Data Type	Logical Addresses	Comment	Hmi Visible	Hmi Accessible	Hmi Writable
Led1	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.0		True	True	True
Start	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.0		True	True	True
Stop	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.1		True	True	True
Potenciometro1	Standard-Variablentabelle	Int	%IW10		True	True	True
SP1(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD12		True	True	True
SP1(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD16		True	True	True
SensorNivel1	Standard-Variablentabelle	Int	%IW12		True	True	True
PV1(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD4		True	True	True
PV1(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD8		True	True	True
CV1(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD20		True	True	True
V1_llenado	Standard-Variablentabelle	Int	%QW10		True	True	True
V1_desague	Standard-Variablentabelle	Int	%QW12		True	True	True
Start_HMI	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10.0.2		True	True	True
Stop_HMI	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10.0.3		True	True	True

Act_Tablero_HMI	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.0		True	True	True
Act_HMI	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.1		True	True	True
Manu_Auto_HMI	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.4		True	True	True
Activa_Autom	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.5		True	True	True
VH1	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 200		True	True	True
V3_desague	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 20		True	True	True
VH4	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 210		True	True	True
VH1_Activa	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.6		True	True	True
VH2	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 205		True	True	True
VH2_Activa	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 0.7		True	True	True
VH4_Activa	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.0		True	True	True
V2_llenado	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 14		True	True	True
Potenciometro2	Standard-Variablentabelle	Int	%IW1 4		True	True	True
SP2(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 32		True	True	True
SP2(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 36		True	True	True
SensorNivel2	Standard-Variablentabelle	Int	%IW1 6		True	True	True

PV2(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 24		True	True	True
PV2(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 28		True	True	True
Potenciometro3	Standard-Variablentabelle	Int	%IW1 8		True	True	True
SensorNivel3	Standard-Variablentabelle	Int	%IW2 0		True	True	True
SP3(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 48		True	True	True
SP3(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 52		True	True	True
PV3(cm)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 40		True	True	True
PV3(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 44		True	True	True
V2_desague	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 16		True	True	True
V3_llenado	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 18		True	True	True
VH6	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 215		True	True	True
VH6_Activa	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.1		True	True	True
LL1	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.2		True	True	True
LL2	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.3		True	True	True
LL3	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.4		True	True	True
LH3	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.5		True	True	True

LH2	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.6		True	True	True
LH1	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 1.7		True	True	True
Manu_Auto_Ta blero	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.2		True	True	True
PV1_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 22		True	True	True
PV2_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 24		True	True	True
PV3_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 26		True	True	True
SP1_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 28		True	True	True
SP2_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 30		True	True	True
SP3_Display	Standard-Variablentabelle	Int	%QW 32		True	True	True
V1_Tanque1_M	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 2.0		True	True	True
V2_Tanque2	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.6		True	True	True
Factory_Run	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.4		True	True	True
V2_Tanque2_M	Standard-Variablentabelle	Bool	%M10 2.1		True	True	True
Emergency_Sto p	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.3		True	True	True
Start_Indicador	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.1		True	True	True
Stop_Indicador	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.2		True	True	True

V1_Tanque1	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.5		True	True	True
V3_Tanque3	Standard-Variablentabelle	Bool	%I0.7		True	True	True
V3_Tanque3_M	Standard-Variablentabelle	Bool	%M102.2		True	True	True
V1_Tanque1_Indicador	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.3		True	True	True
V2_Tanque2_Indicador	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.4		True	True	True
V3_Tanque3_Indicador	Standard-Variablentabelle	Bool	%Q0.5		True	True	True
Factory_Run_M	Standard-Variablentabelle	Bool	%M102.3		True	True	True
SP1_HMI	Standard-Variablentabelle	Int	%MW220		True	True	True
SP1_HMI_Tablero	Standard-Variablentabelle	Int	%MW225		True	True	True
SensorFlujo1	Standard-Variablentabelle	Int	%IW22		True	True	True
Flujo1(It/s)	Standard-Variablentabelle	Int	%MW35		True	True	True
Tag_3	Standard-Variablentabelle	Real	%MD260		True	True	True
Flujo1	Standard-Variablentabelle	Real	%MD56		True	True	True
SensorFlujo2	Standard-Variablentabelle	Int	%IW24		True	True	True
Flujo2	Standard-Variablentabelle	Real	%MD60		True	True	True
SensorFlujo3	Standard-Variablentabelle	Int	%IW26		True	True	True

Flujo3	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 64		True	True	True
SP2_HMI	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 230		True	True	True
SP2_HMI_Tabl ero	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 235		True	True	True
SP3_HMI	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 240		True	True	True
SP3_HMI_Tabl ero	Standard-Variablentabelle	Int	%MW 245		True	True	True
CV2(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 68		True	True	True
CV3(%)	Standard-Variablentabelle	Real	%MD 72		True	True	True

ANEXO 09

Tabla de variables del servidor OPC

Tag Name,Address,Data Type,Respect Data Type,Client
Access,Scan Rate,Scaling,Raw Low,Raw High,Scaled Low,Scaled
High,Scaled Data Type,Clamp Low,Clamp High,Eng
Units,Description,Negate Value

CV1,"MD20",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
CV2,"MD68",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
CV3,"MD72",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Factory_Run_M,"M102.3",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Flujo_T1,"MD56",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Flujo_T2,"MD60",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Flujo_T3,"MD64",Float,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LH1,"M101.7",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LH2,"M101.6",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LH3,"M101.5",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LL1,"M101.2",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LL2,"M101.3",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LL3,"M101.4",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
LuzStart,"Q0.0",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Manu_Auto,"M100.4",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Manu_Auto_Indicador,"M100.5",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Nivel_T1,"MD4",Float,1,RO,100,,,,,,,,,,,,,"",
Nivel_T2,"MD24",Float,1,RO,100,,,,,,,,,,,,,"",
Nivel_T3,"MD40",Float,1,RO,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP1_HMI,"MW220",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP1_HMI_Tablero,"MW225",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP2_HMI,"MW230",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP2_HMI_Tablero,"MW235",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP3_HMI,"MW240",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
SP3_HMI_Tablero,"MW245",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Start,"M100.2",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Stop,"M100.3",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
Stop_Indicador,"Q0.2",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH1,"MW200",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH1_Activar,"M100.6",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH2,"MW205",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH2_Activa,"M100.7",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH4,"MW210",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH4_Activa,"M101.0",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH6,"MW215",Word,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",
VH6_Activa,"M101.1",Boolean,1,R/W,100,,,,,,,,,,,,,"",

ANEXO 10

Programación en Matlab

%Tanques en Cascada

%Linealización de la función

clear all;

clc;

%Datos para el proyecto:

%Parámetros:

%k1, k2, k3 son iguales ya que las válvulas son de la misma característica

k1=0.036; %m³/s

k2=0.036;

k3=0.036;

k4=0.036;

%Abertura de las valvulas para el punto de equilibrio

a1=0.5;

a2=0.45;

a3=0.35;

a4=0.3;

%Abertura de las Válvulas

a1s=0:0.1:1;

a2s=0:0.1:1;

a3s=0:0.1:1;

a4s=0:0.1:1;

%Las áreas son iguales ya que los tanques son de las mismas características

A1=1.77;%m²

A2=1.77;

A3=1.77;

%Altura de los tanques en el punto de equilibrio:

h1= ((k1*a1)/(k2*a2))^2;

h2= (((k2^2)*(a2^2))*h1)/(k3*a3)^2;

h3= (((k3^2)*(a3^2))*h2)/(k4*a4)^2;

%Linealización por espacio de estados:

A=[-((k2*a2)/(2*A1*sqrt(abs(h1-h2)))) 0 0;...

((k2*a2)/(2*A2*sqrt(abs(h1-h2)))) -((k3*a3)/(2*A2*sqrt(abs(h2-h3))))

0;...

0 ((k3*a3)/(2*A3*sqrt(abs(h2-h3)))) -((k4*a4)/(2*A3*sqrt(h3)))];

B=[k1/A1; 0; 0];

C=[0 0 1];

D=0;

%Conversión de espacio de estados a función de transferencia

[n d]=ss2tf(A,B,C,D);

G=tf(n,d) % Función de transferencia obtenida

figure

step(G);

title('Representación del Modelo Matemático');

grid on

%Resultado de las alturas variando cada una de las valvulas

h1s= ((k1*a1s)/(k2*a2))^2;

h2s= (((k2^2)*(a2^2))*h1s)/(k3*a3)^2;

h3s= (((k3^2)*(a3^2))*h2s)/(k4*a4)^2;

%Vaciado

h1b=((k1*a1)/(k2*a2s))^2;

h2b= (((k2^2)*(a2^2))*h1b)/(k3*a3)^2;

h3b= (((k3^2)*(a3^2))*h2b)/(k4*a4)^2;

```

figure
subplot(2,3,1);
plot(a1s,h1s), grid
title('Variación en la válvula de entrada a1');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a1');
subplot(2,3,2);
plot(a2s,h2s), grid
title('Variación en la válvula de entrada a2');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a2');
subplot(2,3,3);
plot(a3s,h3s), grid
title('Variación en la válvula de entrada a3');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a3');
subplot(2,3,4);
plot(a2s,h1b), grid
title('Variación en la válvula de entrada a2');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a2');
subplot(2,3,5);
plot(a3s,h2b), grid
title('Variación en la válvula de entrada a3');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a3');
subplot(2,3,6);
plot(a4s,h3b), grid
title('Variación en la válvula de entrada a4');
ylabel('Altura (h)');
xlabel('Abertura de la válvula a4');

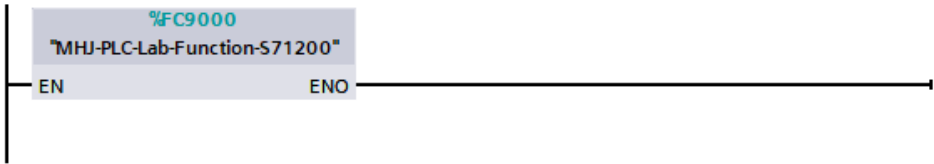
```


ANEXO 11

Programación del Main [OB1]

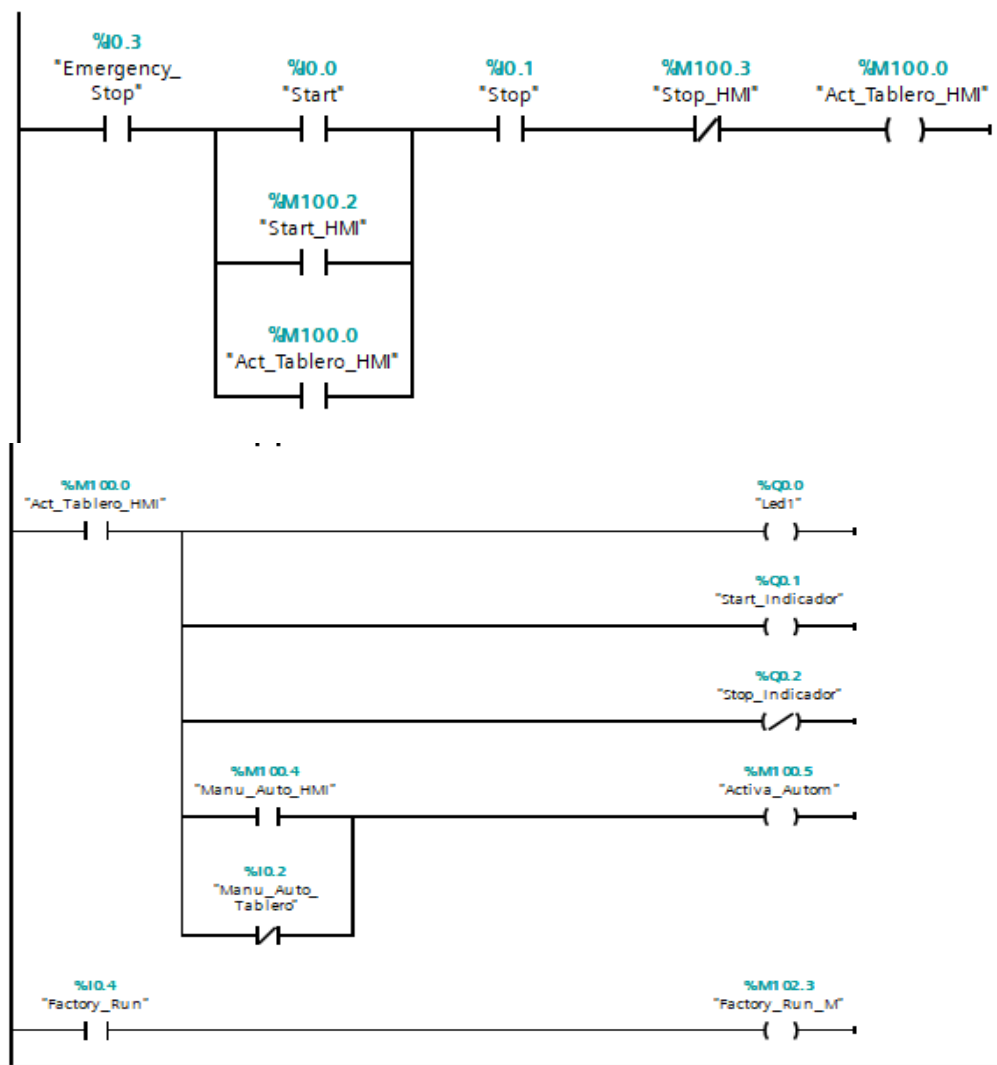
Segmento 1: COMUNICACION PLCSIM CON FACTORY IO

Comentario



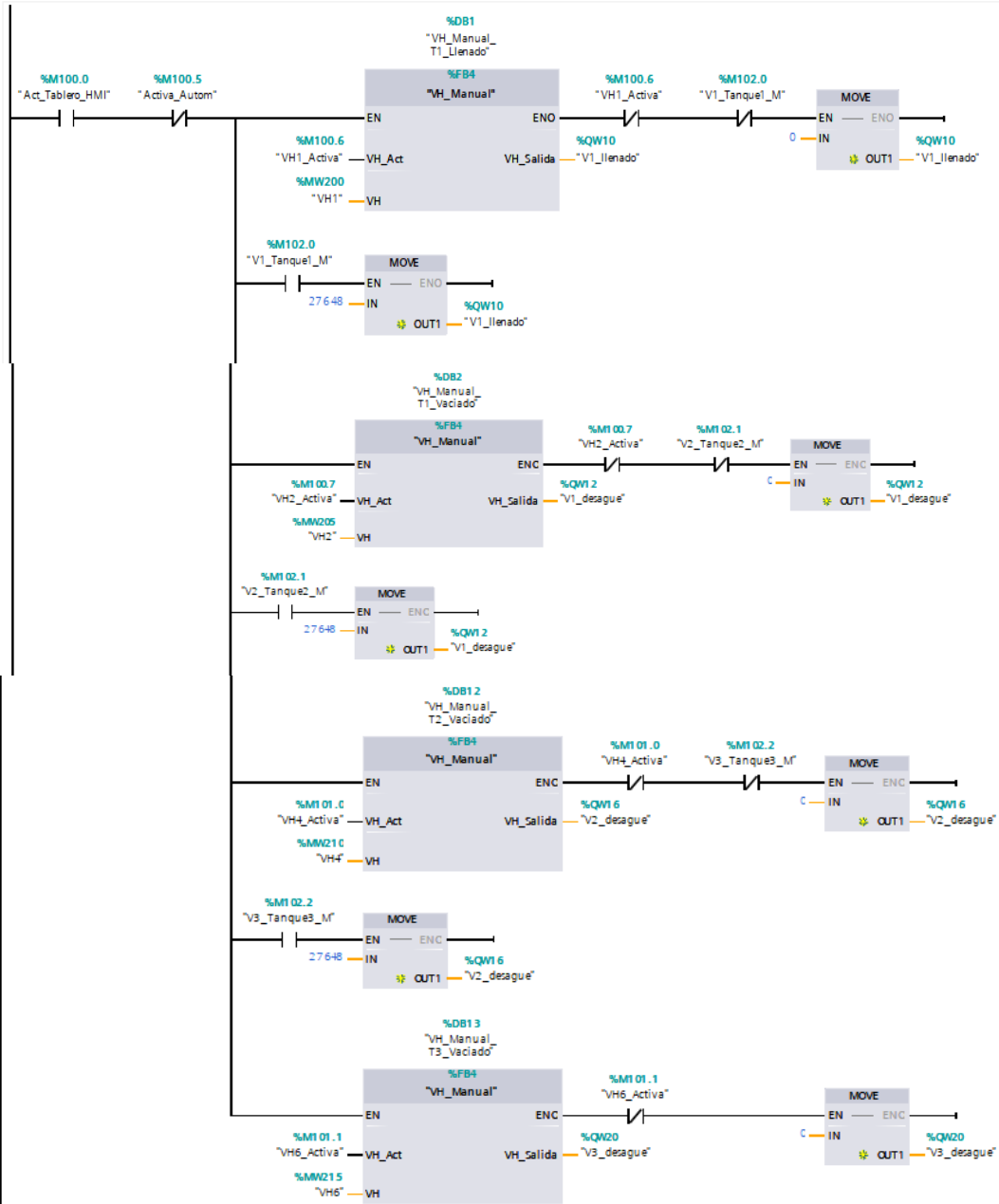
Segmento 2: Inicio, Parada y Modo del proceso

Comentario



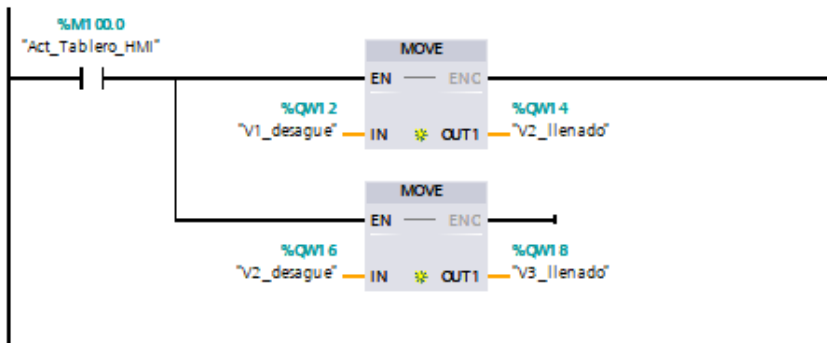
Segmento 3: Llenado y Vaciado - Manual

Comentario



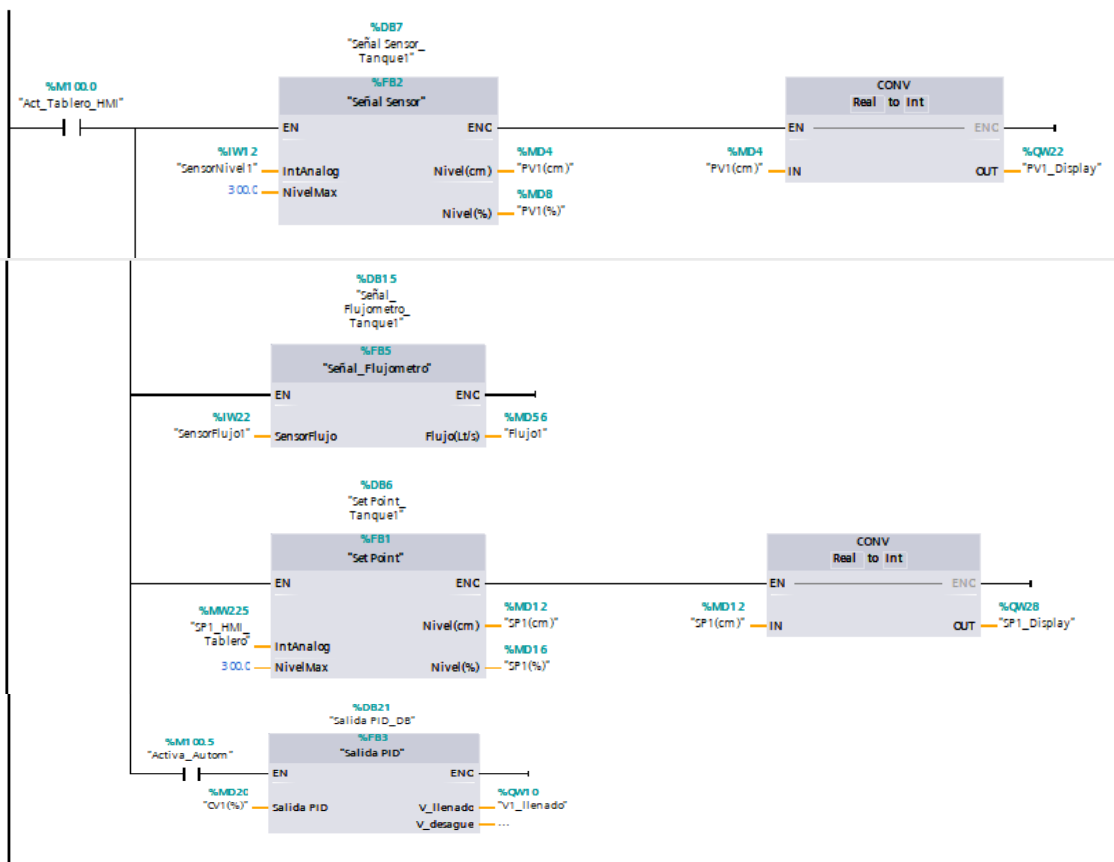
Segmento 4: Transferencia de Flujo, tanque 1 al tanque 2 y del 2 al 3

Comentario



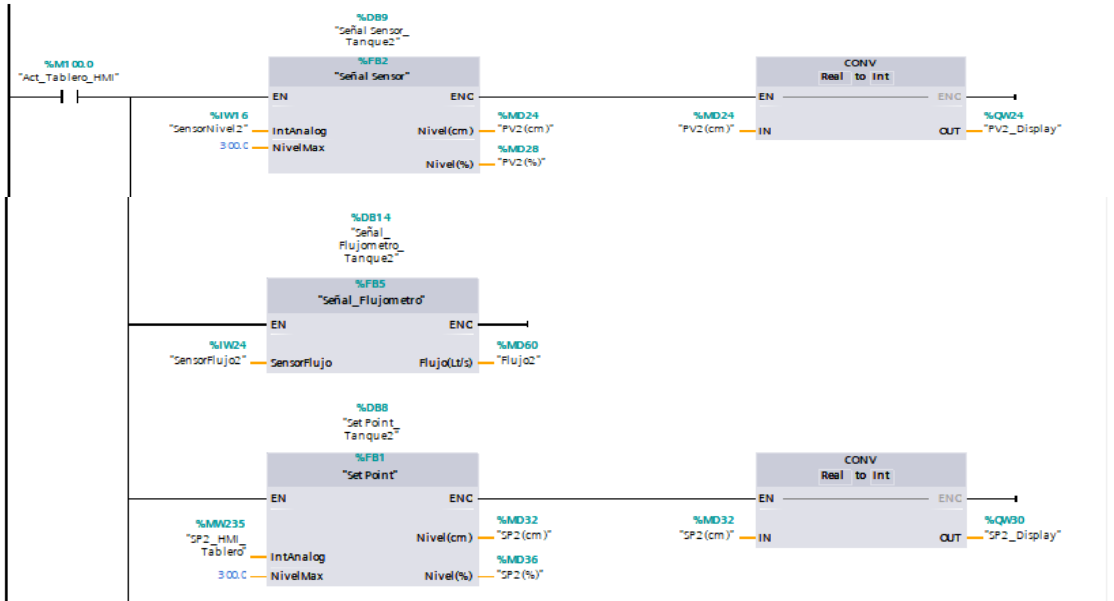
Segmento 5: Control Tanque 1

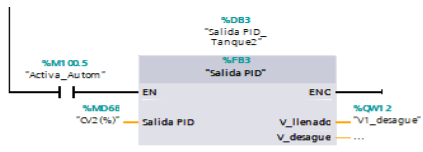
Comentario



Segmento 6: Control Tanque 2

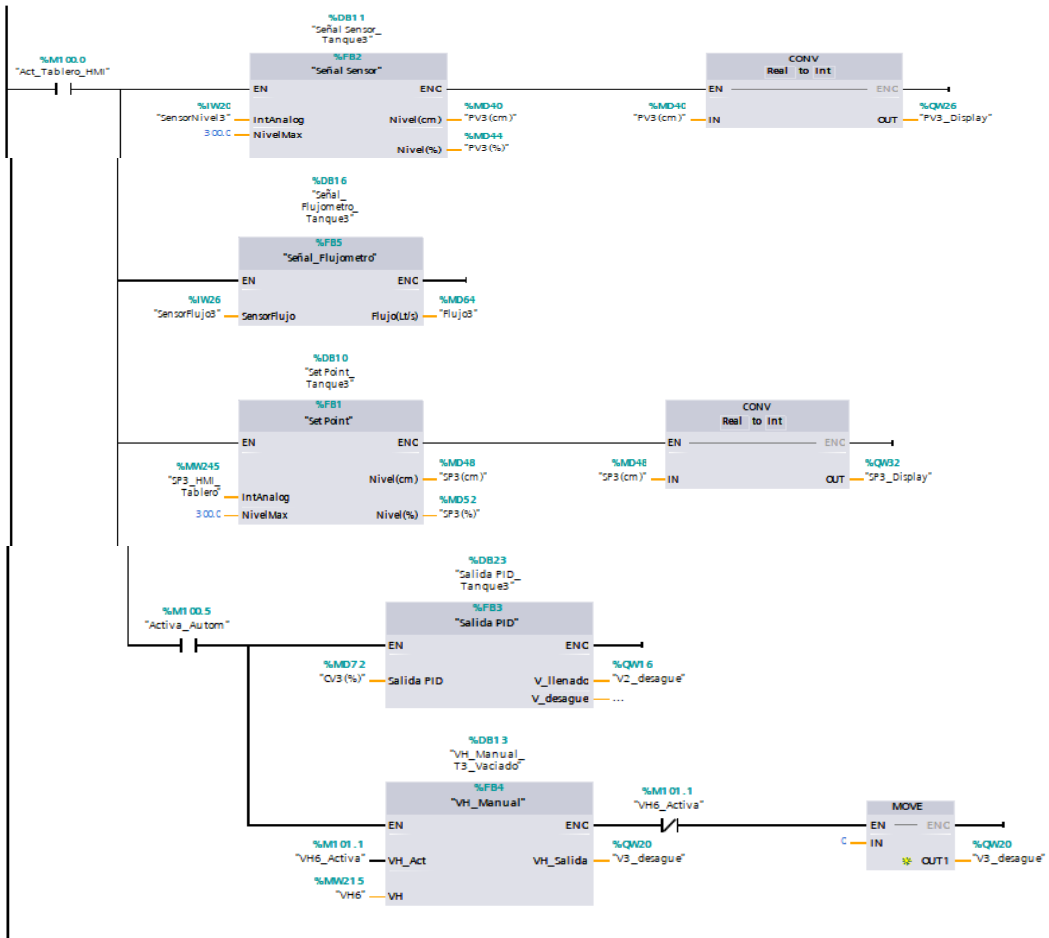
Comentario





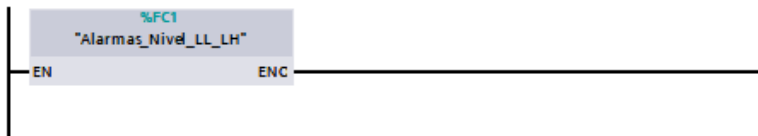
Segmento 7: Control Tanque 3

Comentario



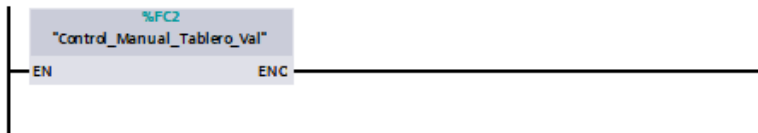
▼ **Segmento 8:** Alarmas de Nivel, Tanque 1, Tanque 2, Tanque 3

Comentario



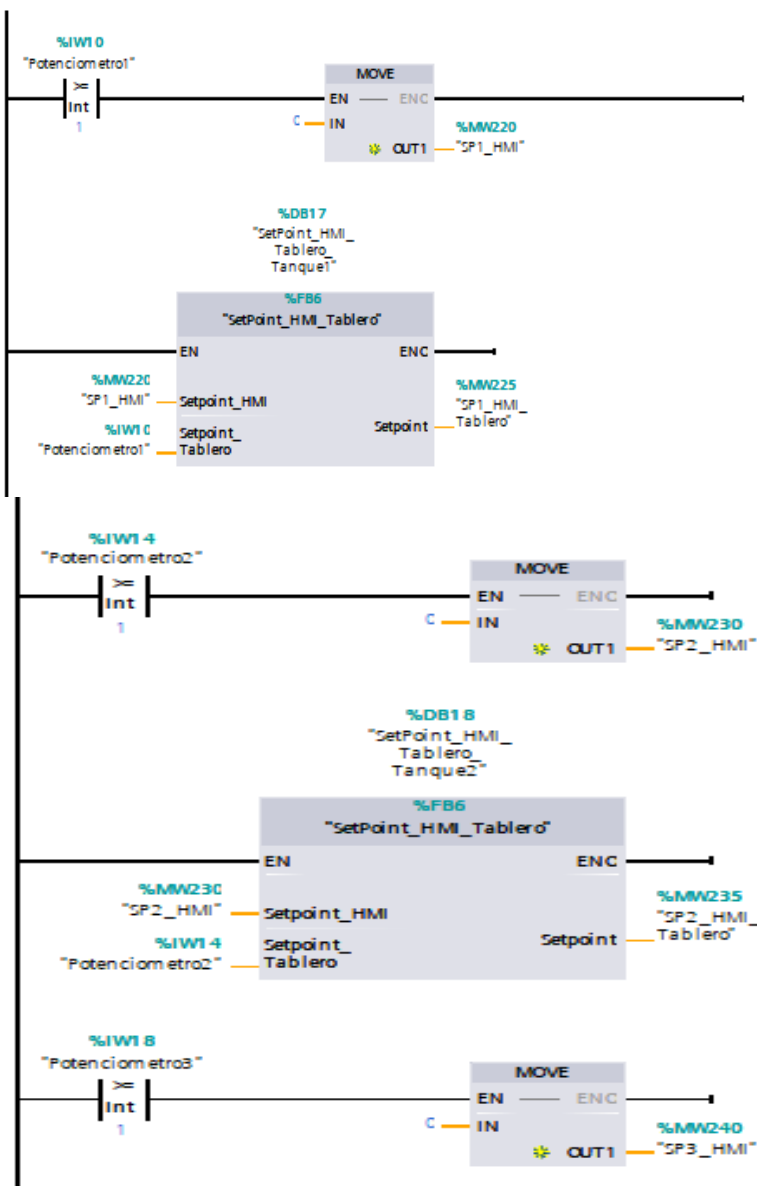
▼ **Segmento 9:** Control Manual Tablero

Comentario



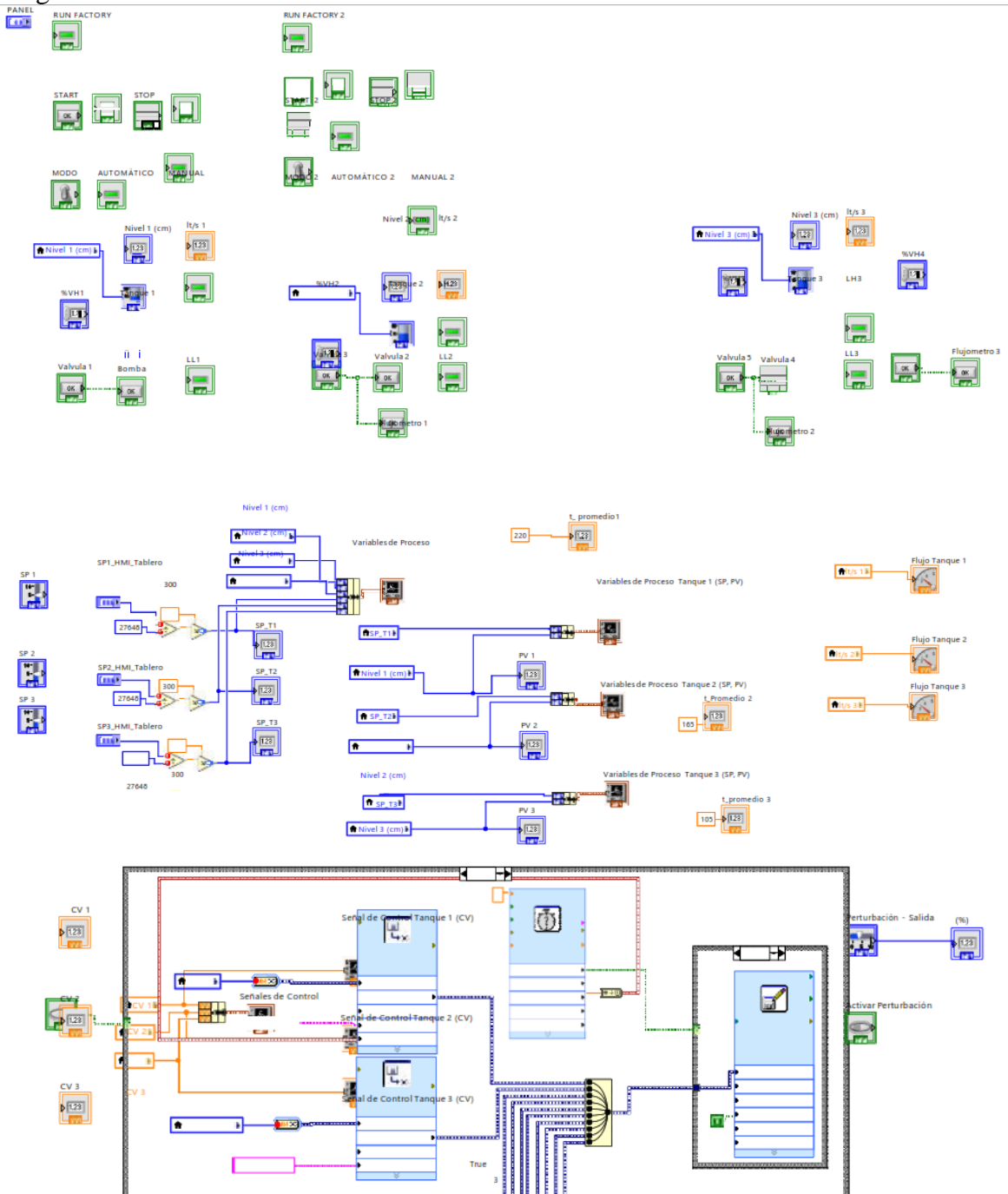
▼ **Segmento 10:** Setpoint HMI y Tablero_Modo Automatico

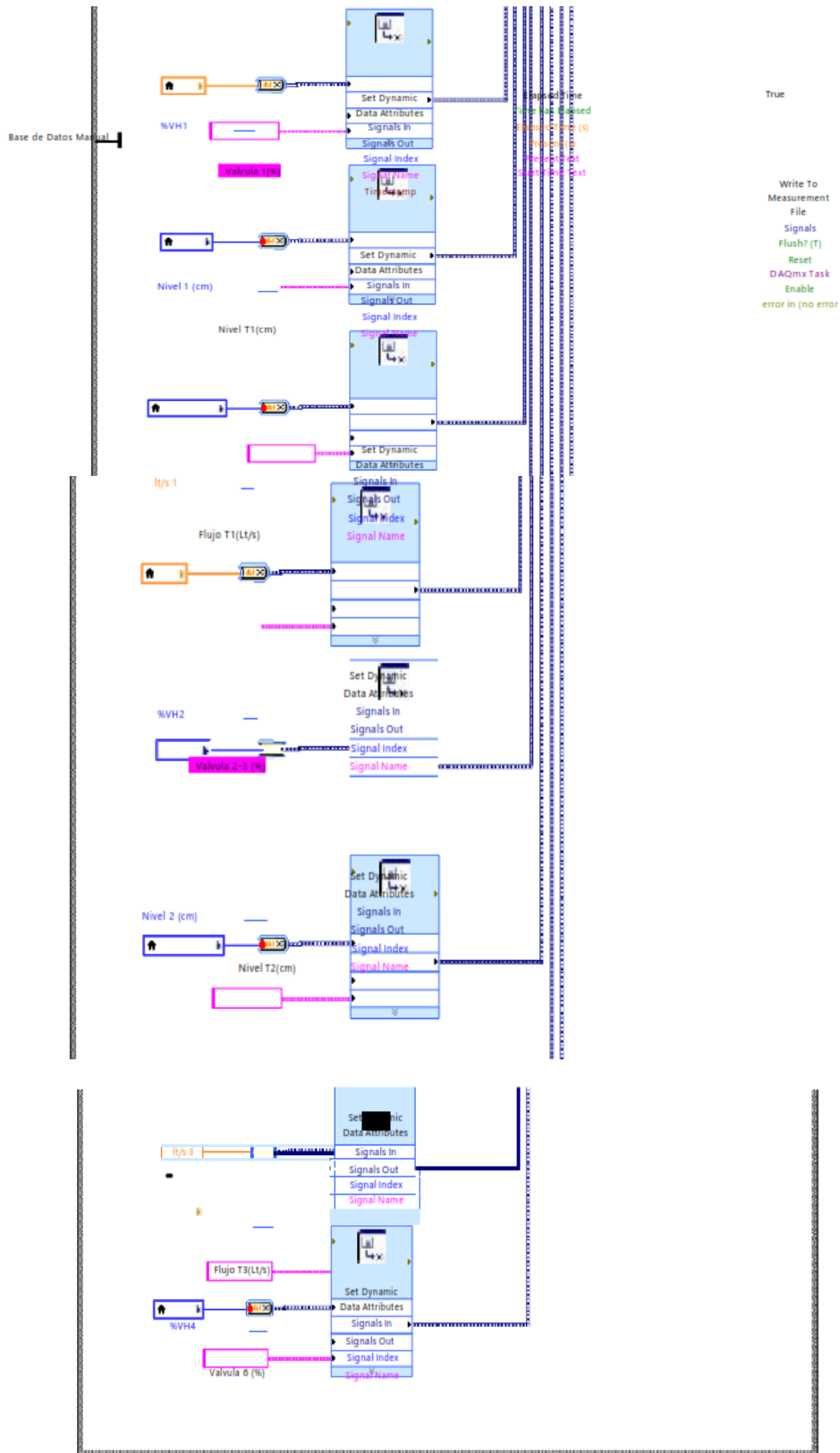
Comentario



ANEXO 12

Programación en LabVIEW





ANEXO 13

Tabla de datos obtenidos para el ejemplo

Time	SP T1(c m)	PV T1(c m)	CV T1(%)	SP T2(c m)	PV T2(c m)	CV T2(%)	SP T3(c m)	PV T3(c m)	CV T3(%)	Pertur bación (Salid a)(%)
4/3/2021 21:21:26,26 8	151	79	100	149	65	100	151	83	100	50
4/3/2021 21:21:30,26 8	151	81	100	149	68	100	151	88	100	50
4/3/2021 21:21:33,26 8	151	82	100	149	70	100	151	91	100	50
4/3/2021 21:21:37,26 8	151	84	100	149	72	100	151	96	100	50
4/3/2021 21:21:40,26 9	151	86	100	149	74	100	151	99	100	50
4/3/2021 21:21:44,26 8	151	88	100	149	76	100	151	104	100	50
4/3/2021 21:21:48,26 8	151	89	100	149	78	100	151	108	100	50
4/3/2021 21:21:52,26 8	151	91	100	149	80	100	151	113	100	50
4/3/2021 21:21:56,26 8	151	93	100	149	82	100	151	117	100	50
4/3/2021 21:22:00,26 8	151	94	100	149	84	100	151	121	100	50
4/3/2021 21:22:04,26 8	151	96	100	149	86	100	151	125	100	50
4/3/2021 21:22:07,26 8	151	97	100	149	87	100	151	128	100	50
4/3/2021 21:22:11,26 9	151	98	100	149	89	100	151	132	100	50
4/3/2021 21:22:15,26 8	151	100	100	149	91	100	151	136	96,84 2651	50


4/3/2021 21:22:19,26 8	151	101	100	149	93	100	151	140	91,41 7625	50
4/3/2021 21:22:23,26 8	151	102	100	149	95	100	151	144	83,61 1115	50
4/3/2021 21:22:26,26 8	151	103	100	149	97	100	151	146	76,93 4692	50
4/3/2021 21:22:29,26 8	151	104	100	149	99	100	151	148	70,53 9467	50
4/3/2021 21:22:33,26 8	151	105	100	149	102	100	151	150	62,91 6336	50
4/3/2021 21:22:37,26 8	151	107	100	149	106	100	151	152	56,52 1164	50
4/3/2021 21:22:40,26 9	151	108	100	149	109	100	151	152	52,70 5257	50
4/3/2021 21:22:44,26 8	151	109	100	149	113	100	151	153	49,17 1234	50
4/3/2021 21:22:48,26 9	151	110	100	149	117	100	151	153	46,92 067	50
4/3/2021 21:22:52,27 2	151	111	100	149	121	100	151	153	45,64 1548	50
4/3/2021 21:22:56,26 8	151	111	100	149	124	100	151	152	44,78 6259	50
4/3/2021 21:22:59,26 8	151	112	100	149	127	100	151	152	44,62 2608	50
4/3/2021 21:23:03,26 8	151	113	100	149	130	100	151	152	44,64 8838	50
4/3/2021 21:23:06,26 9	151	113	100	149	133	100	151	152	45,07 7496	50
4/3/2021 21:23:10,26 7	151	114	100	149	136	98,17 6552	151	151	45,92 1646	50
4/3/2021 21:23:13,26 9	151	115	100	149	139	94,46 508	151	151	46,64 6889	50

4/3/2021 21:23:17,26 8	151	116	100	149	143	85,59 6336	151	151	47,77 1954	50
4/3/2021 21:23:21,26 8	151	118	100	149	146	76,98 0934	151	151	48,66 3307	50
4/3/2021 21:23:24,26 8	151	120	100	149	148	66,29 9393	151	150	49,66 5226	50
4/3/2021 21:23:28,26 8	151	123	100	149	150	59,68 8351	151	150	50,23 299	50
4/3/2021 21:23:31,26 8	151	126	100	149	151	52,98 8491	151	150	50,75 1137	50
4/3/2021 21:23:35,26 7	151	130	100	149	151	48,53 2589	151	150	51,03 0415	50
4/3/2021 21:23:39,26 8	151	134	100	149	151	46,19 7693	151	150	51,11 1084	50
4/3/2021 21:23:42,26 8	151	137	95,43 9178	149	151	45,31 8054	151	150	51,07 9983	50
4/3/2021 21:23:46,26 8	151	141	86,17 2592	149	151	45,08 7669	151	151	50,99 4156	50
4/3/2021 21:23:49,26 9	151	144	78,17 8902	149	150	45,40 451	151	151	50,86 4883	50
4/3/2021 21:23:53,26 8	151	147	68,48 0957	149	150	46,09 5325	151	151	50,69 4191	50
4/3/2021 21:23:57,26 8	151	150	60,04 7718	149	150	47,00 259	151	151	50,52 5623	50
4/3/2021 21:24:01,26 8	151	151	54,05 7671	149	149	47,86 2698	151	151	50,37 2868	50
4/3/2021 21:24:05,26 8	151	152	50,11 1431	149	149	48,59 3681	151	151	50,23 6797	50
4/3/2021 21:24:09,26 8	151	152	47,74 5239	149	149	49,17 6201	151	151	50,17 0208	50
4/3/2021 21:24:12,26 8	151	152	46,95 8279	149	149	49,49 873	151	151	50,09 9716	50

4/3/2021 21:24:16,26 9	151	152	46,70 253	149	149	49,81 5327	151	151	50,06 3553	50
4/3/2021 21:24:19,26 9	151	152	46,87 3127	149	149	49,98 1918	151	151	50,05 2124	50
4/3/2021 21:24:23,26 8	151	151	47,48 0141	149	149	50,09 7206	151	151	50,05 497	50
4/3/2021 21:24:26,26 9	151	151	48,06 015	149	149	50,12 9948	151	151	50,08 6117	50
4/3/2021 21:24:30,26 7	151	151	48,58 0082	149	149	50,16 9102	151	151	50,07 0255	50
4/3/2021 21:24:33,26 9	151	151	49,05 8353	149	149	50,18 5444	151	151	50,05 2174	50
4/3/2021 21:24:37,26 8	151	151	49,36 5311	149	149	50,19 5957	151	151	50,09 1228	50
4/3/2021 21:24:40,26 9	151	151	49,84 7874	149	149	50,16 4566	151	151	50,08 173	50
4/3/2021 21:24:44,26 8	151	151	50,23 6073	149	149	50,13 3659	151	151	50,12 5271	50
4/3/2021 21:24:48,26 8	151	151	50,48 5359	149	149	50,11 1481	151	151	50,12 5271	50
4/3/2021 21:24:51,26 9	151	151	50,60 4603	149	149	50,07 7728	151	151	50,12 5271	50
4/3/2021 21:24:55,26 8	151	151	50,65 7257	149	149	50,08 6166	151	151	50,12 5271	50
4/3/2021 21:24:58,26 8	151	151	50,63 1992	149	149	50,05 3715	151	151	50,15 0101	50
4/3/2021 21:25:01,26 8	151	151	50,62 5675	149	149	50,06 4659	151	151	50,18 2362	50
4/3/2021 21:25:05,26 8	151	151	50,59 0473	149	149	50,06 7455	151	151	50,18 911	50
4/3/2021 21:25:09,26 8	151	151	50,51 5785	149	149	50,10 3764	151	151	50,14 6679	50

4/3/2021 21:25:13,26 8	151	151	50,46 0239	149	149	50,06 1478	151	151	50,14 6679	50
4/3/2021 21:25:17,26 8	151	151	50,43 3765	149	149	50,06 2393	151	151	50,14 6679	50
4/3/2021 21:25:20,26 8	151	151	50,39 423	149	149	50,06 2393	151	151	50,14 6679	50

ANEXO 14

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
PRÁCTICA DE LABORATORIO			
ELABORADO POR		APROBADO POR	
Diego Guacapiña		Ing. Luis Cruz	
CARRERA		CODIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELECTROMECHANICA		IELM	SISTEMAS DE CONTROL - PLC
PRÁCTICA N°	LABORATORIO	NOMBRE DE LA PRÁCTICA	DURACIÓN (HORAS)
1	Electromecánica	Interpretación de datos de una planta de nivel en cascada simulada	
1. OBJETIVOS			
<ul style="list-style-type: none"> • Familiarizarse con procesos de tanques en cascada • Conocer el modelamiento matemático del proceso • Interpretar el diagrama P&ID (ANEXO 07) • Experimentar con las Variables SP; PV Y CV del proceso • Experimentar con los parámetros de Sintonización de los controladores PID precargados en el autómatas simulado • Evaluar el comportamiento del proceso simulado • Interpretar los datos obtenidos desde la Aplicación SCADA de la variable de nivel del proceso. 			
2. FUNDAMENTACION TEORICA			
3. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y SOFTWARE NECESARIO			

PC con software's TIA Portal V14, LabVIEW 2018, Factory/IO v2.2.3

4. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

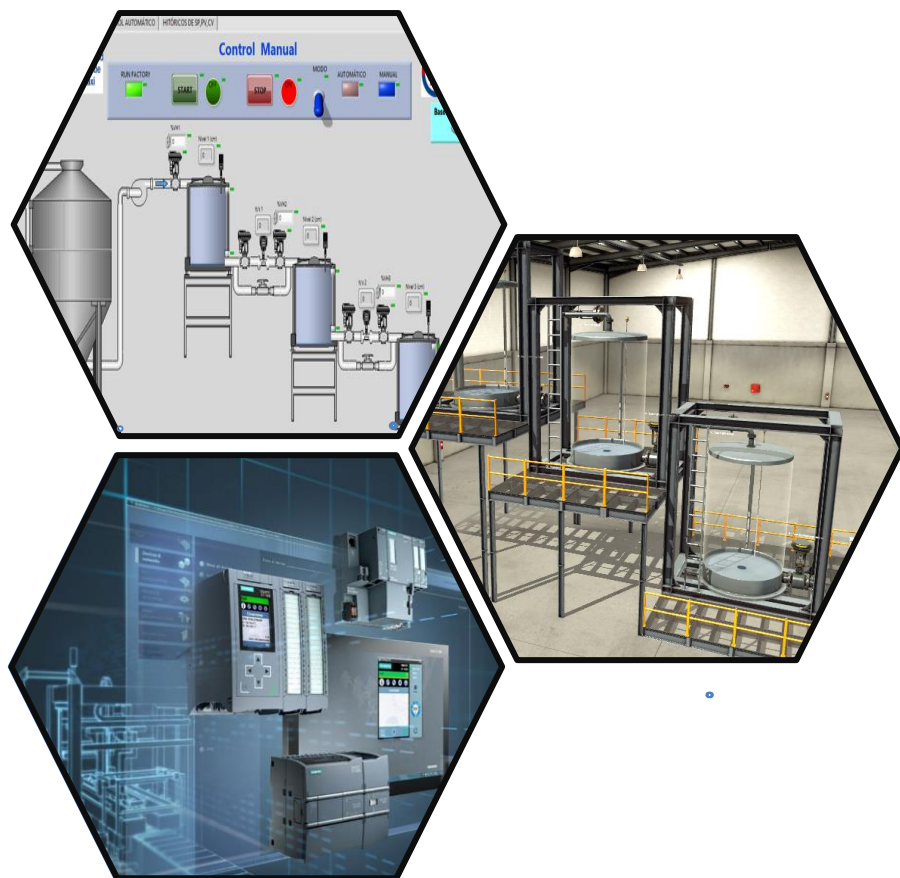
- Dar valores a las variables del proceso
- Cambiar los parámetros de sintonización de los controladores PID (ANEXO 06)
- Compilar y cargar la nueva configuración en el autómata
- Ejecutar los programas de la manera indicada en el manual de operación (ANEXO 15) con el nuevo algoritmo de control
- Obtener datos de Set Point, Variable de proceso y Variable de control de los tres tanques en una hoja de calculo
- Realizar una interpretación de datos en una hoja de cálculo

5. CONCLUSIONES

5. REFERENCIAS

- C. Smith, A. Corripio, "Control Automático de procesos" Ed. Limusa. Primera edición, Tercera reimpresión, 1996
- K. Ogata, Ingeniería de control moderno, 3a ed. México: Ed Pearson, 1998.

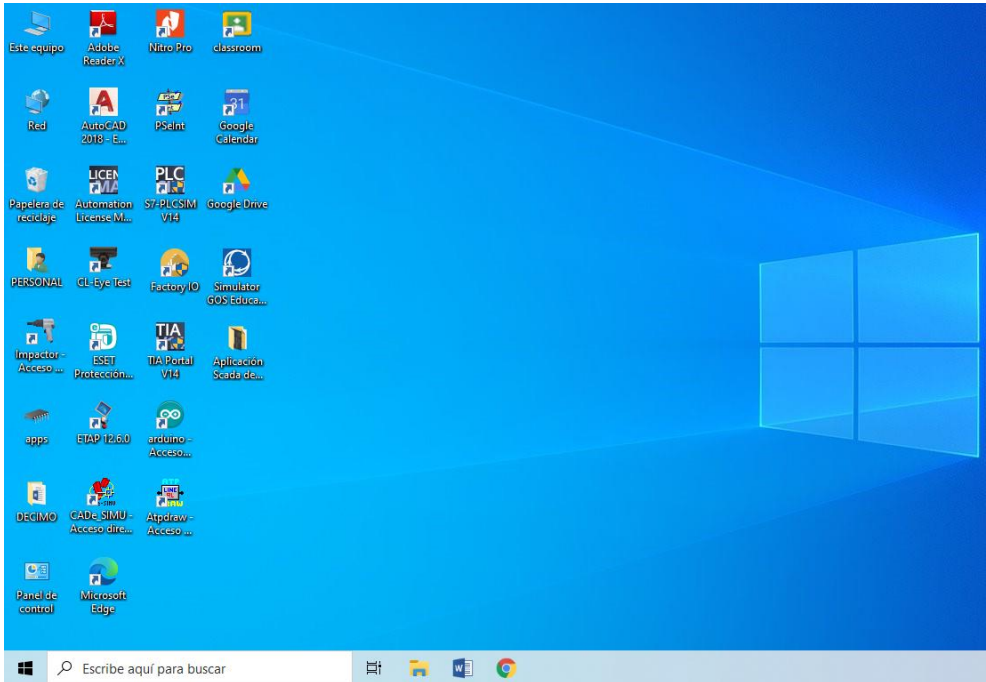
ANEXO 16
MANUAL DE CONFIGURACION Y OPERACIÓN DE, “APLICACIÓN SCADA PARA
EL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO SIMULADO DE TRES TANQUES EN
CASCADA”



NOTA: Antes de utilizar el sistema lea detenidamente las instrucciones indicadas en el siguiente manual

1. EJECUCION DEL SISTEMA

Se debe iniciar el sistema en la PC, para ingresar al mismo se debe ubicar la carpeta con el nombre “Aplicación Scada de Nivel 3 Tanques”

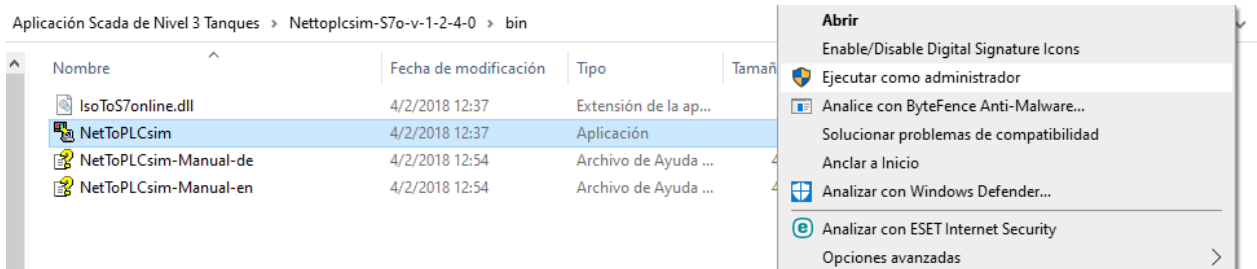


La carpeta contiene varias carpetas y archivos cada una con un nombre específico.

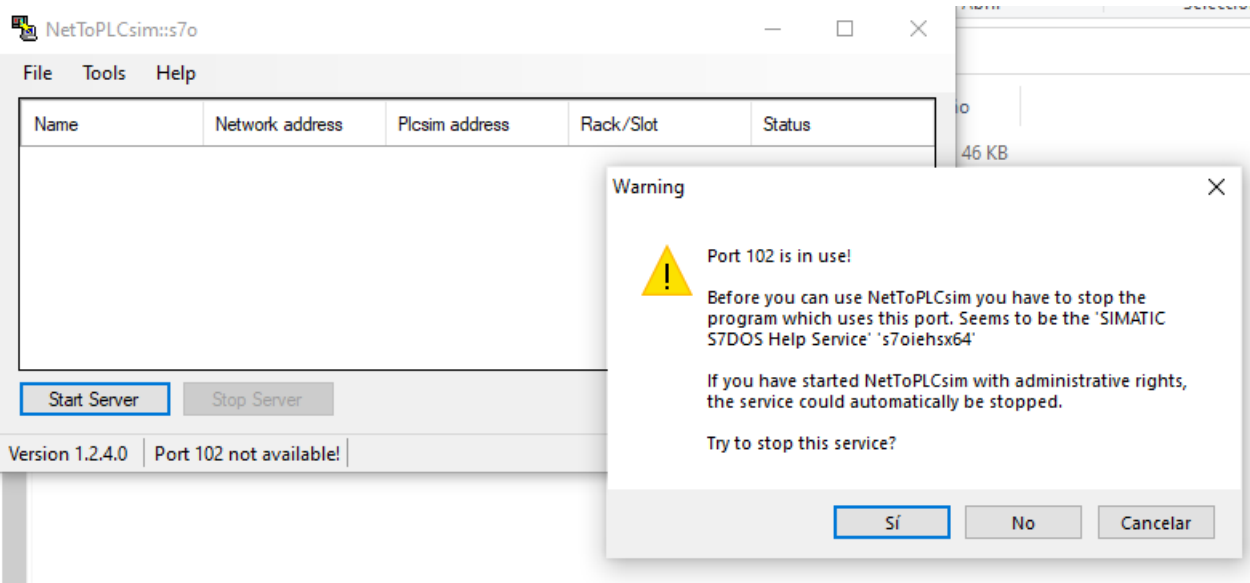
> Aplicación Scada de Nivel 3 Tanques >

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Nettoplcsim-S7o-v-1-2-4-0	24/2/2021 17:55	Carpeta de archivos	
Proyecto_PID_Cascada	24/2/2021 19:29	Carpeta de archivos	
SCADA_LabVIEW	2/3/2021 23:09	Carpeta de archivos	
IN_OUT_PLG	15/12/2020 14:58	Archivo JPG	58 KB
Proyecto_Cascada	20/1/2021 15:08	Factory I/O	140 KB

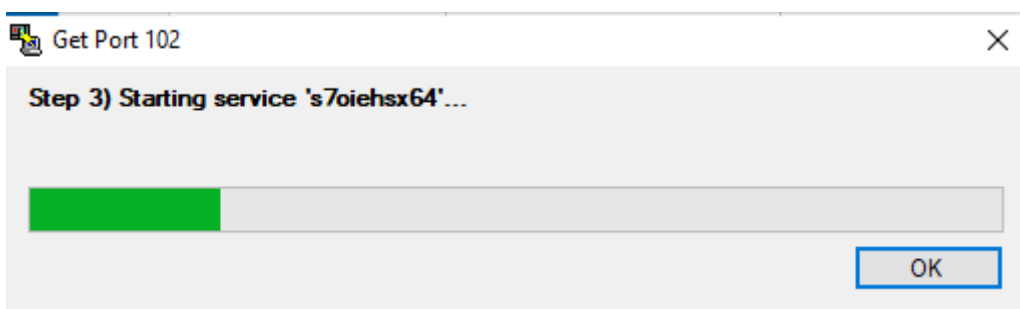
Paso 1.- Abrir la carpeta denominada Nettoplcsim-S7o-v-1-2-4-0 / bin y ejecutar como administrador el archivo de tipo aplicación que se muestra a continuación.



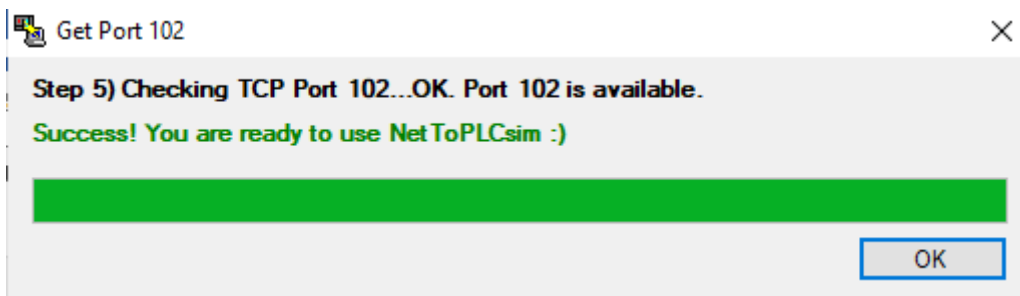
En un momento aparecerá el siguiente mensaje al cual se hace clic en “Si”



De manera automática aparecerá una barra de estado que nos indicará la disponibilidad del puerto TCP 102

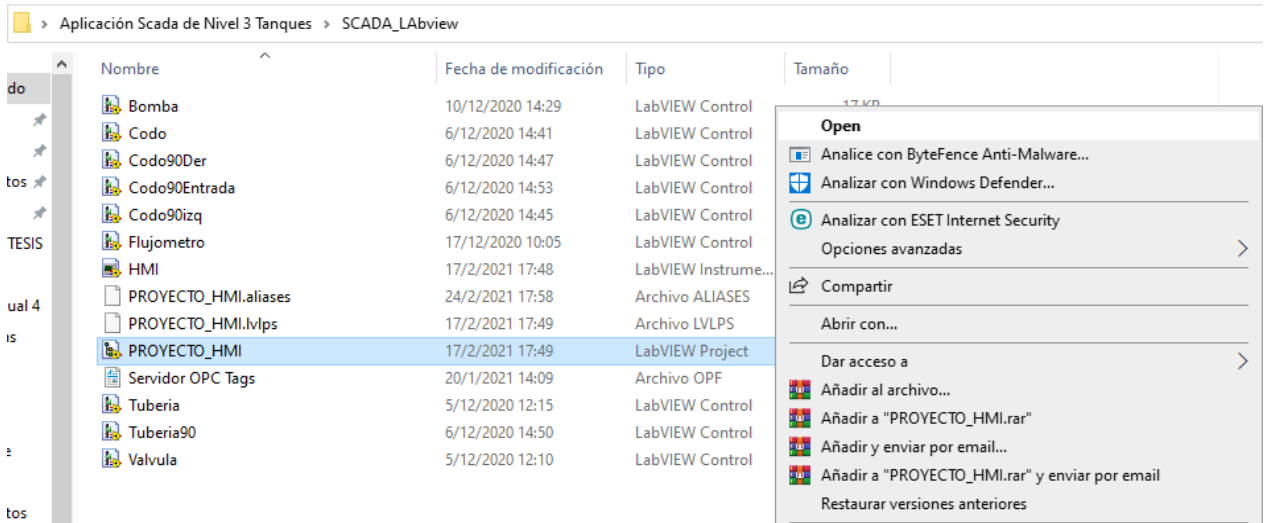


Este proceso tarda unos segundos y finaliza con un mensaje que nos indica que el puerto TCP 102 está disponible y que “estas listo para usar NetToPLCsim”

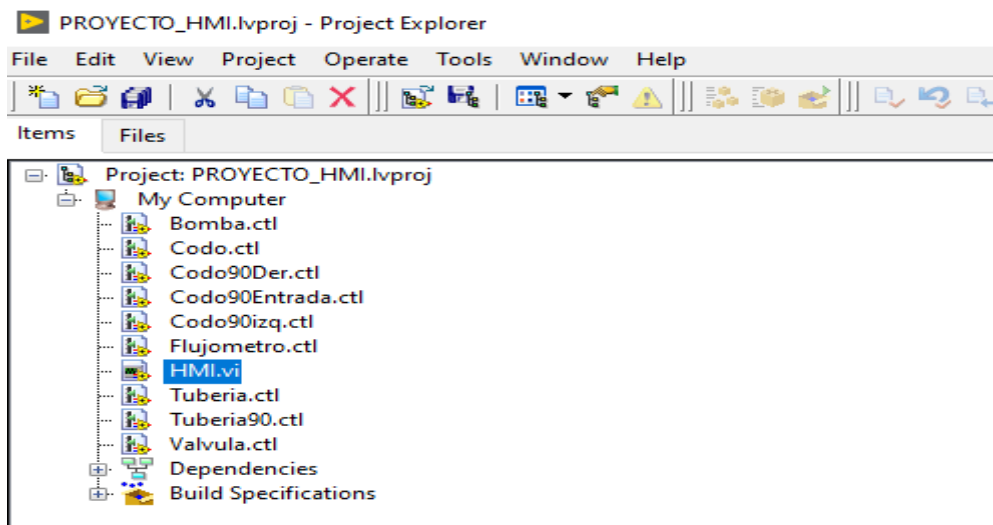


Antes de iniciar el servicio se debe abrir el software de programación TIA portal e iniciar la aplicación SCADA ejecutada en LabVIEW

Paso 2.- Abrir la carpeta denominada “SCADA_LabVIEW” y ejecutar el proyecto denominado “PROYECTO_HMI”

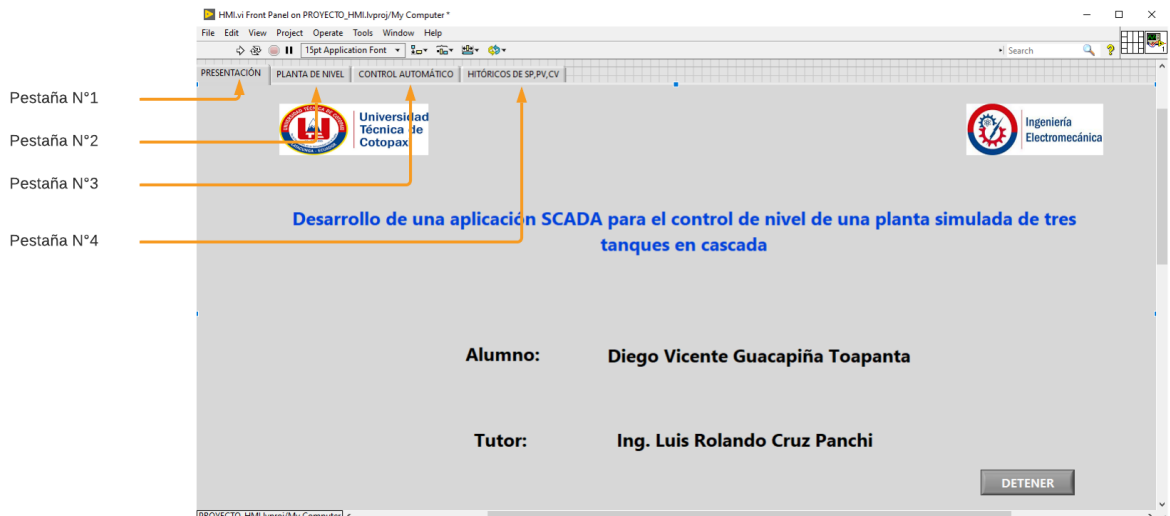


En el proyecto abierto se procede a abrir el archivo VI denominado “HMI” haciendo doble clic sobre él.

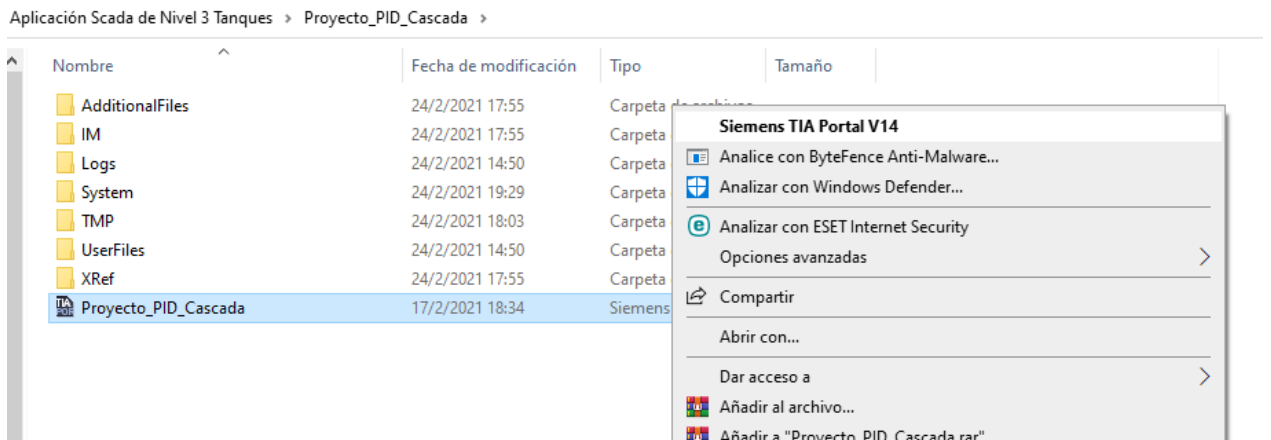


Este archivo de tipo VI ejecuta la aplicación SCADA para el control del proceso dentro del cual existen 4 pestañas que indican:

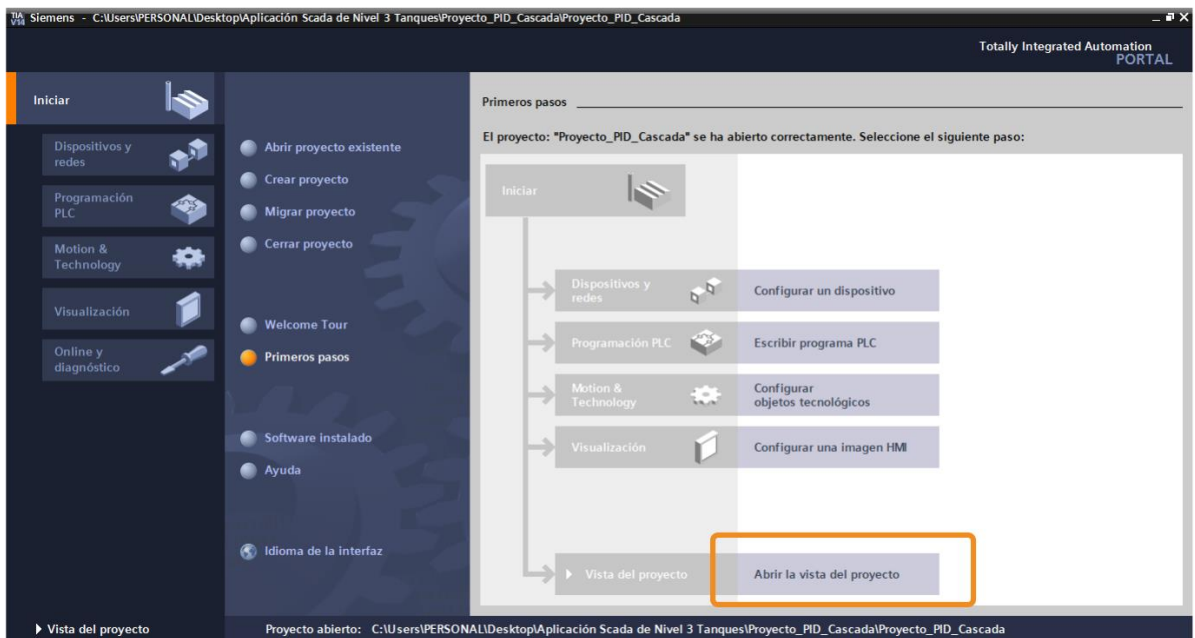
- **Pestaña N°1:** Presentación del proyecto
- **Pestaña N°2:** Representación gráfica de la planta con el control manual
- **Pestaña N°3:** Control Automático de la planta
- **Pestaña N°4:** Representación de las curvas de tendencia del proceso



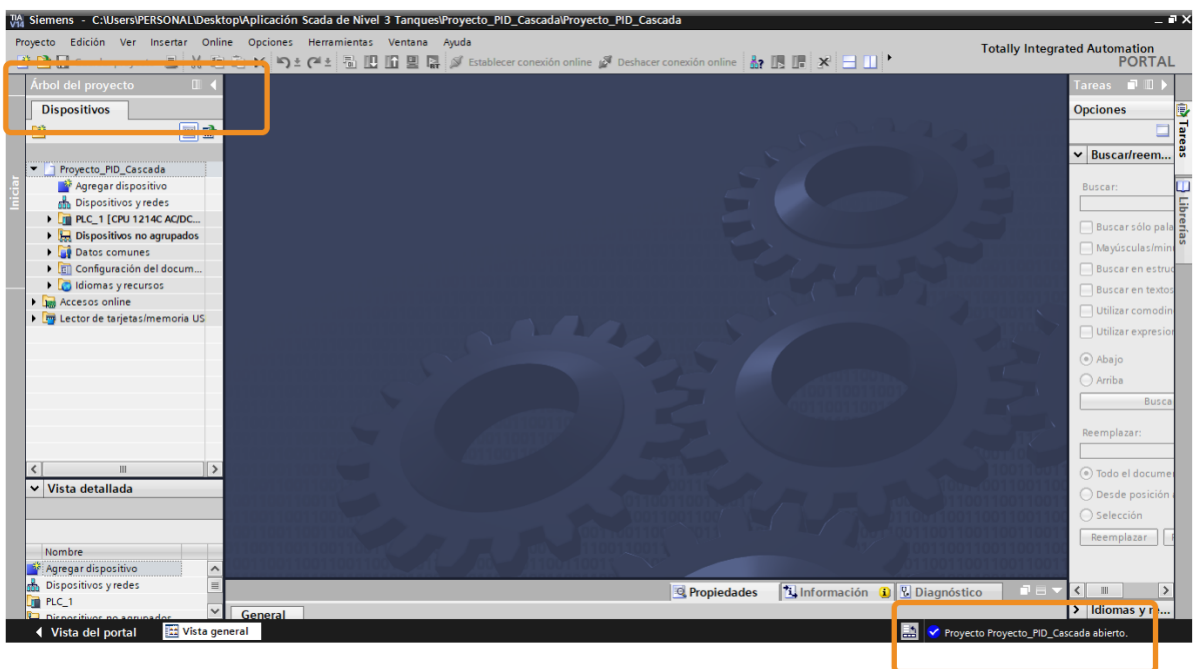
Paso 3.- Abrir la carpeta denominada “Proyecto_PID_Cascada” y se ejecuta el proyecto que tiene el mismo nombre, el cual es un archivo que contiene el algoritmo de programación para el PLC simulado.



Este archivo demora unos segundos en abrirse y al hacerlo se debe seleccionar “Abrir vista del proyecto”

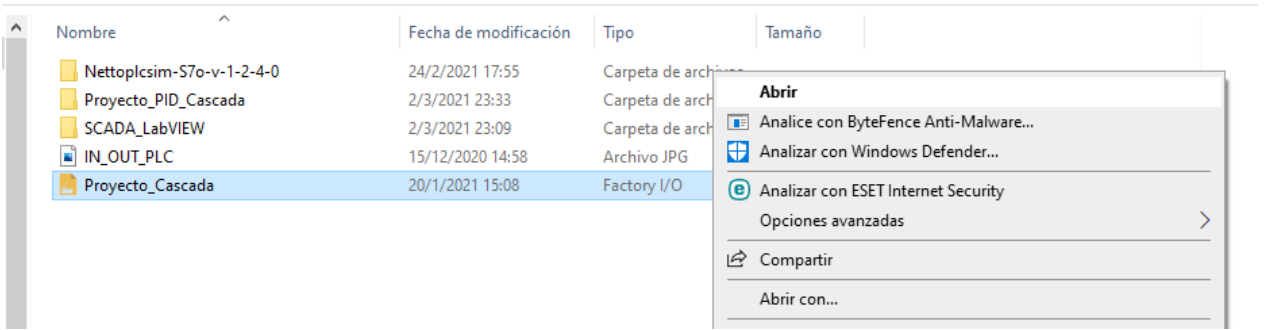


Esto nos permite ingresar al árbol del proyecto y nos indica un mensaje en la parte inferior el nombre del archivo abierto.

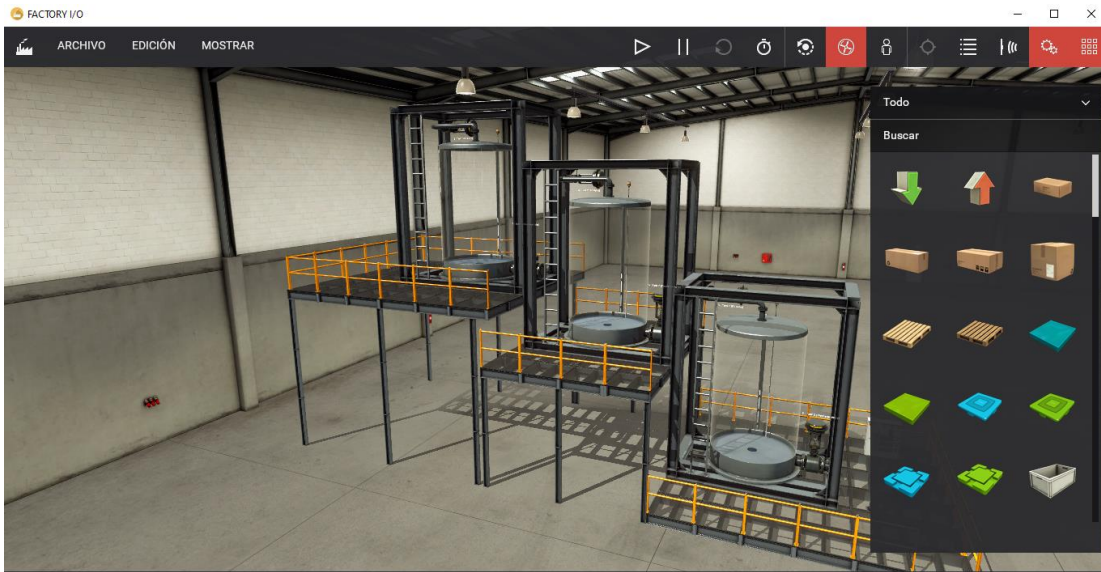


Paso 4.- Ejecutar el archivo de FACTORY I/O denominado como “Proyecto_Cascada”

Aplicación Scada de Nivel 3 Tanques



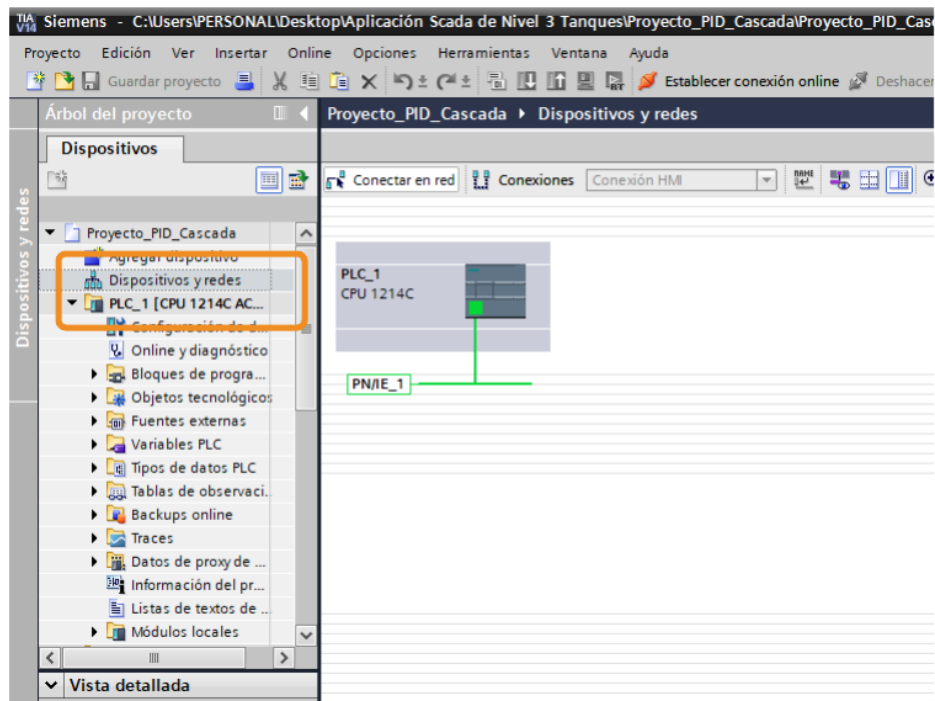
Este archivo contiene la simulación de la planta en el software emulador de PLC's



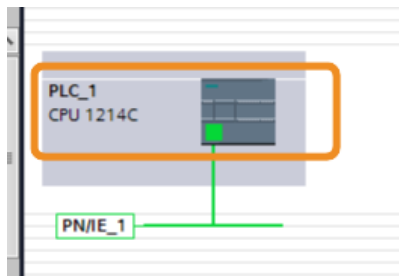
2. SIMULACION DEL PLC

Una vez realizados todos los pasos anteriores se prosigue con la carga del algoritmo al plc simulado

Paso 5.- En el árbol del proyecto se hace doble clic en el apartado de “dispositivos y redes” que nos muestra la vista topológica del proyecto



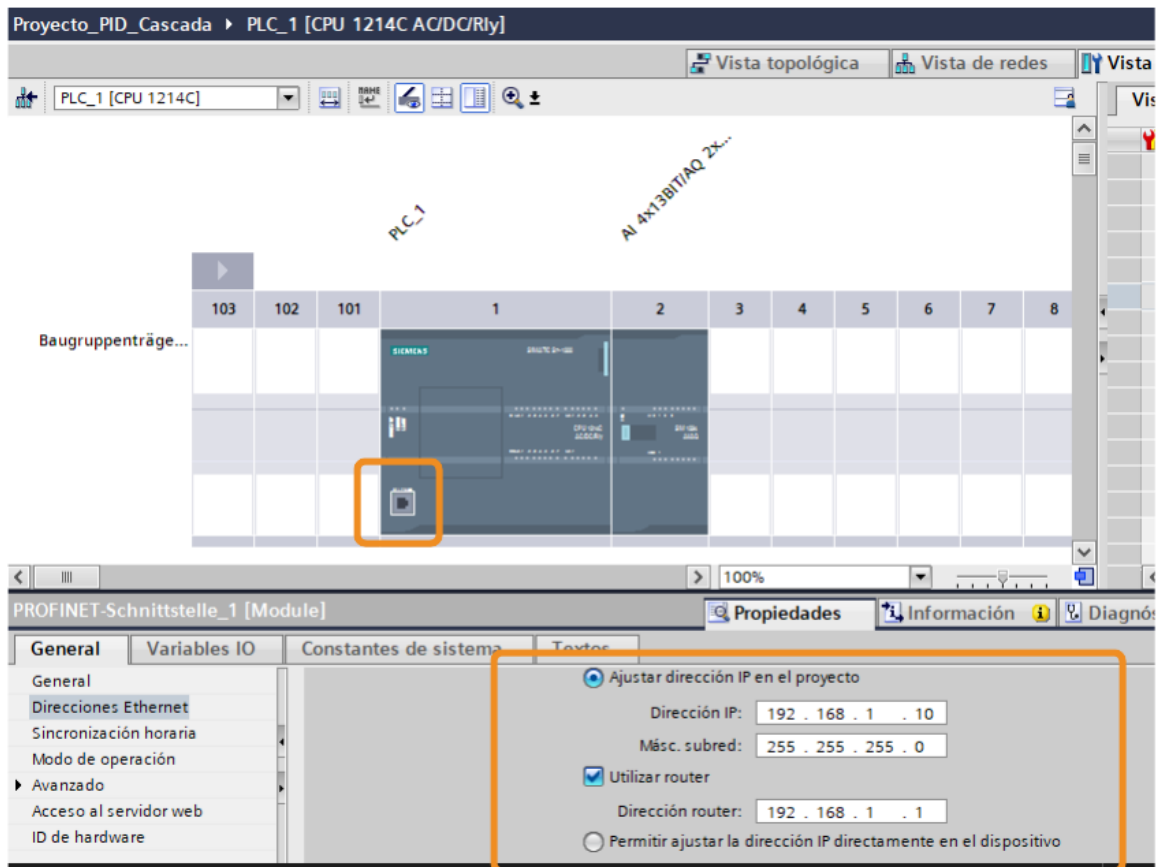
A continuación, se da doble clic sobre el plc para expandir la imagen



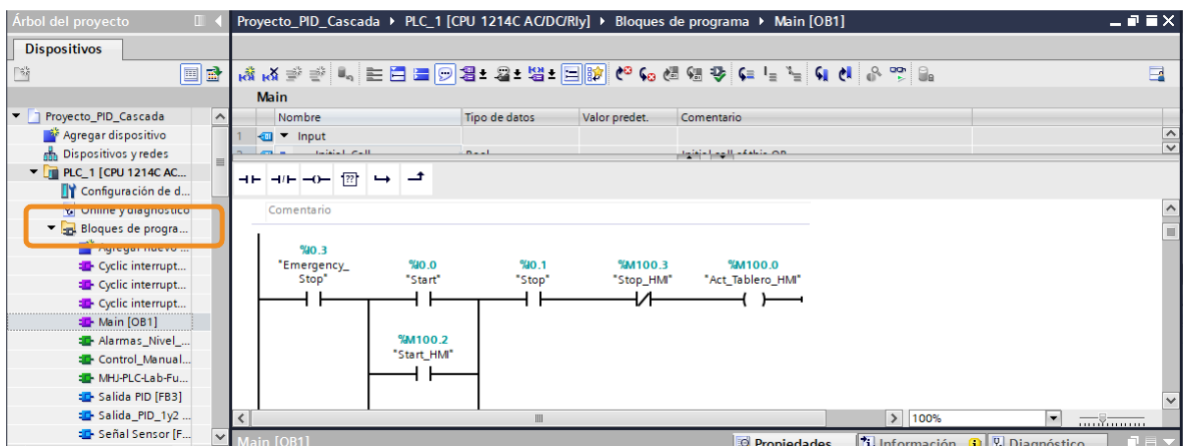
Esto nos muestra los dispositivos utilizados en el proyecto

- PLC_1 CPU 1214ACDCR1y
- Módulo de entradas y salidas digitales AI 4x13 BIT/AQ 2x14BIT

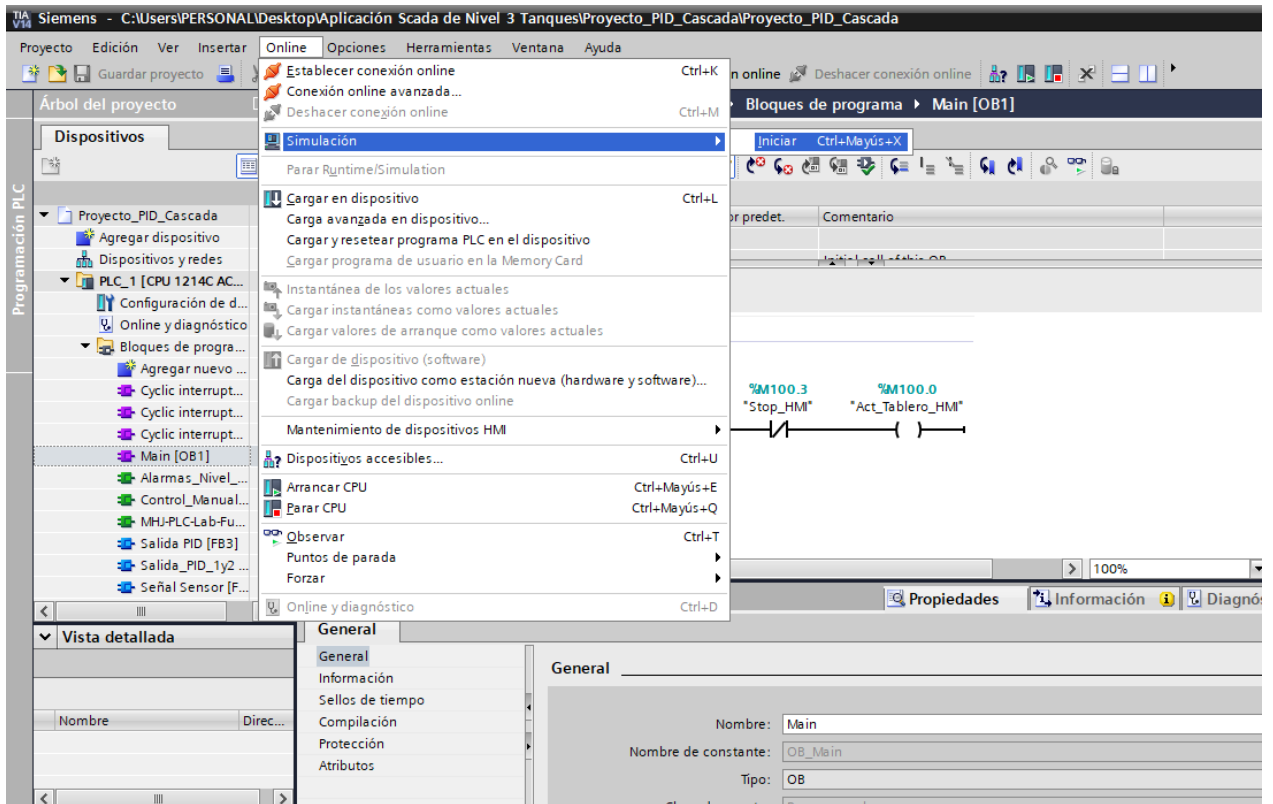
Al hacer clic sobre el símbolo de entrada del cable ethernet se muestra las propiedades del Plc en el cual se ajusta la dirección IP del PLC



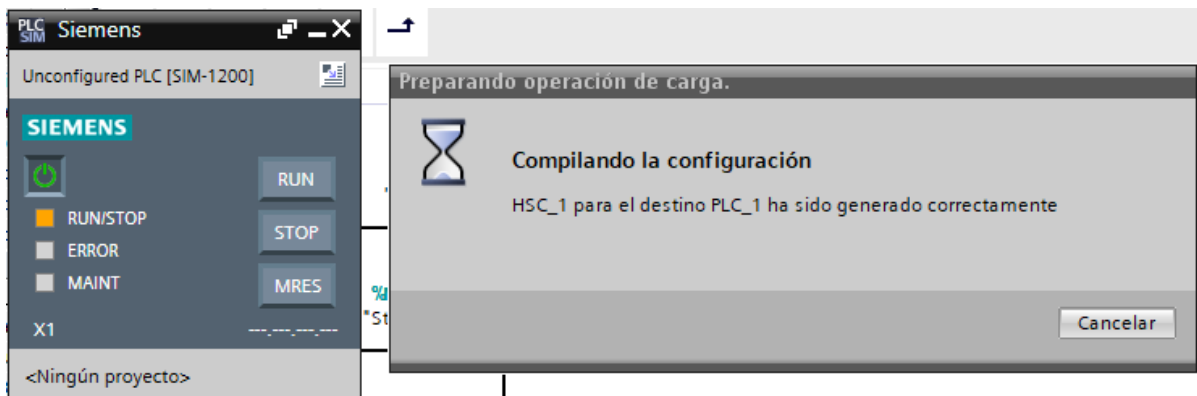
Paso 6.- En el árbol del proyecto se da doble clic en el apartado Bloque de Programa/ Main OB1 que nos muestra el algoritmo que va a ser cargado en el PLC



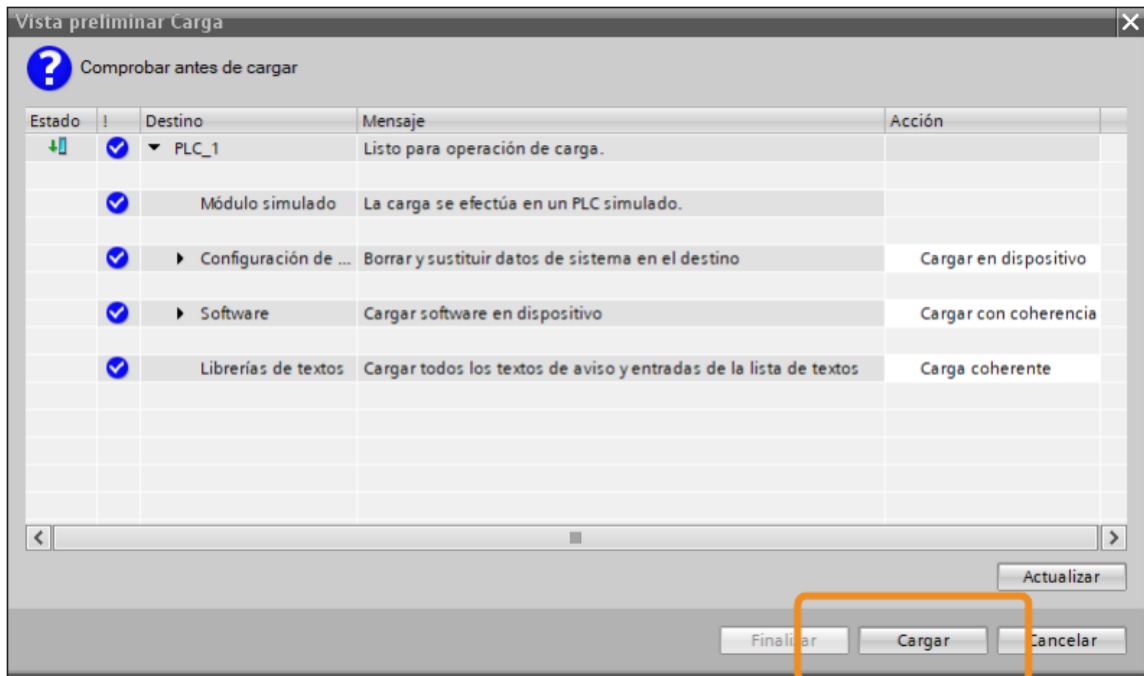
En la pestaña de simulación se procede a iniciar la simulación para posteriormente cargar el código en el PLC



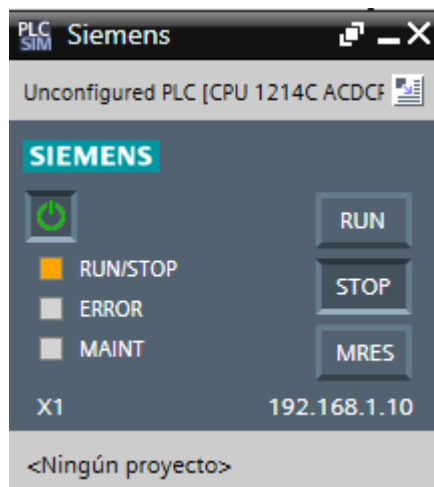
Automáticamente se abre el software PLCsim y comienza la operación de compilación y carga del algoritmo



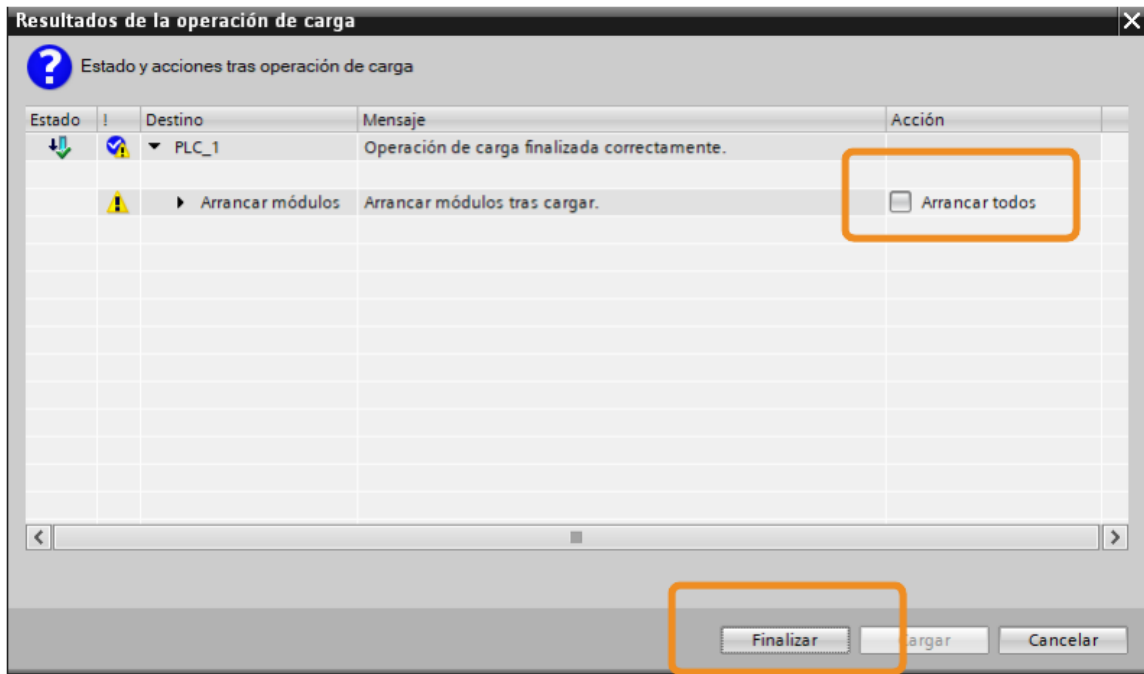
Posterior a la compilación aparece este recuadro que nos indica si queremos realizar la carga lo cual se autoriza haciendo clic en el botón “Cargar”



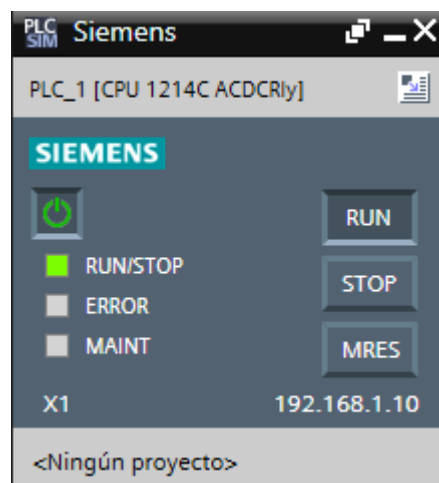
Se puede apreciar que el código y la configuración de dirección IP ha sido cargado con éxito



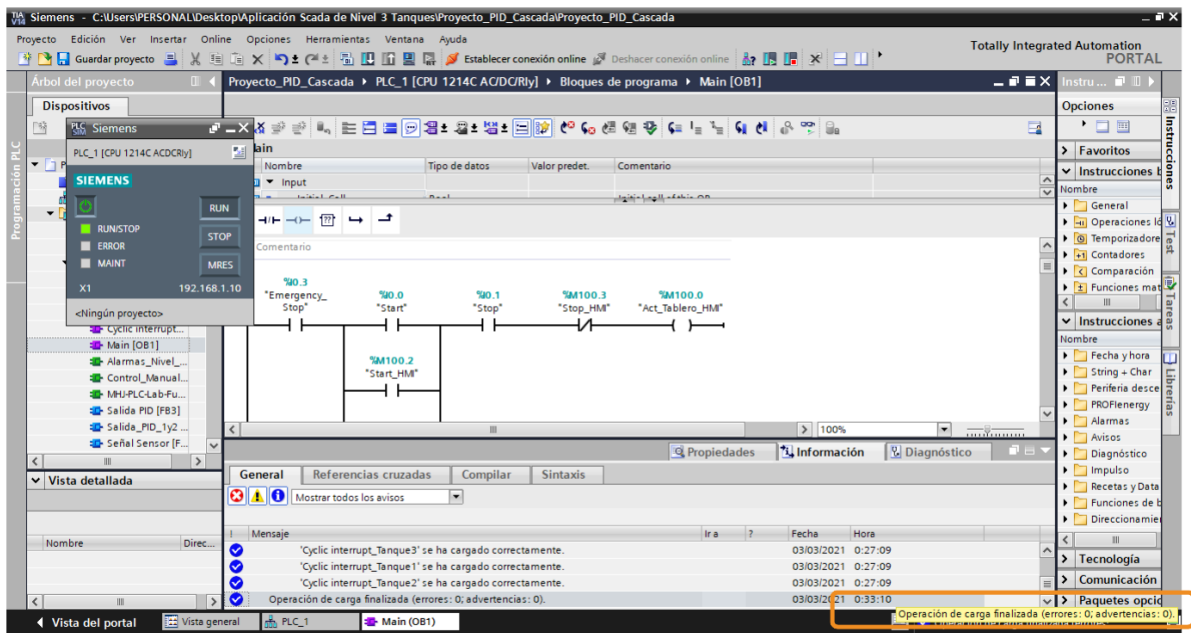
PLC simulado no arranca (RUN) hasta que se de los permisos haciendo clic en “Arrancar todos” y “finalizar”



Una vez finalizado este proceso se puede observar que el PLC cambia su estado a RUN



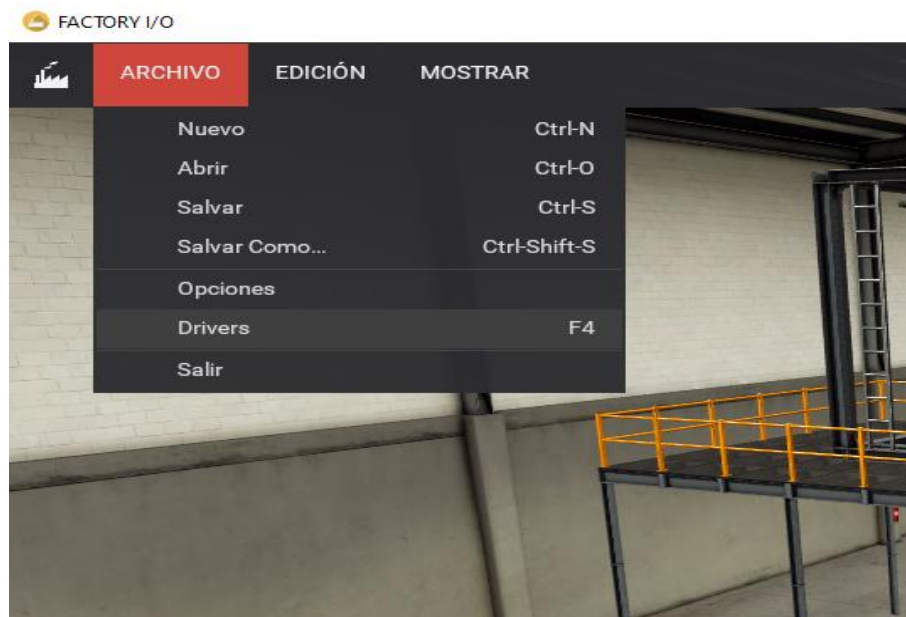
Y en el software de programación nos aparece un mensaje el cual nos indica que la carga se ha realizado con éxito en la parte inferior



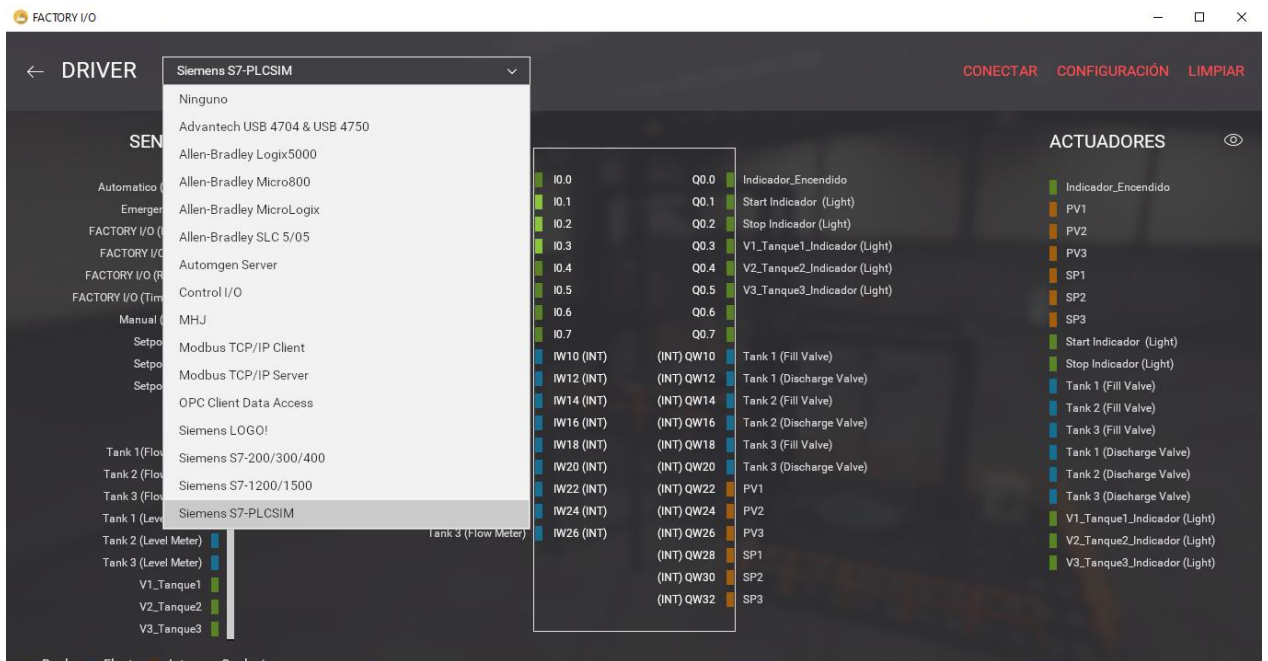
3. COMUNICACIÓN

una vez cargado el algoritmo en el PLC se procede a conectar el mismo con el software de simulación de la planta; el PLC debe estar en estado RUN

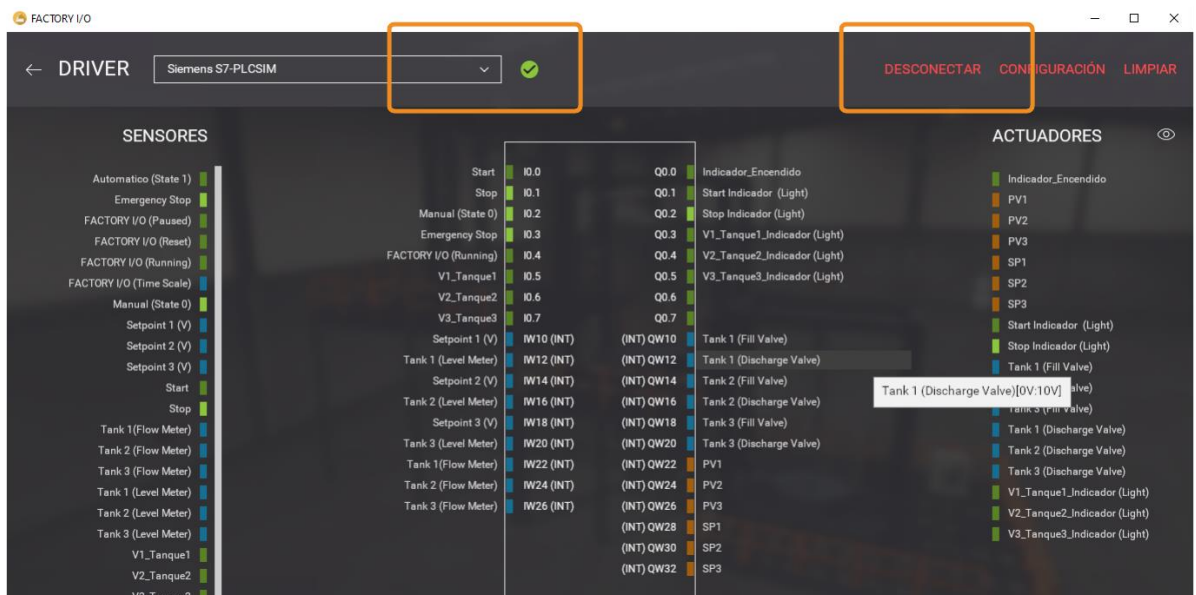
Paso 7.- En el software de simulación de la planta se debe dirigir hacia ARCHIVO/ DRIVERS



Esto hará que se despliegue una lista de Controladores que el software es capaz de emular y se debe elegir Siemens S7 PLCSIM



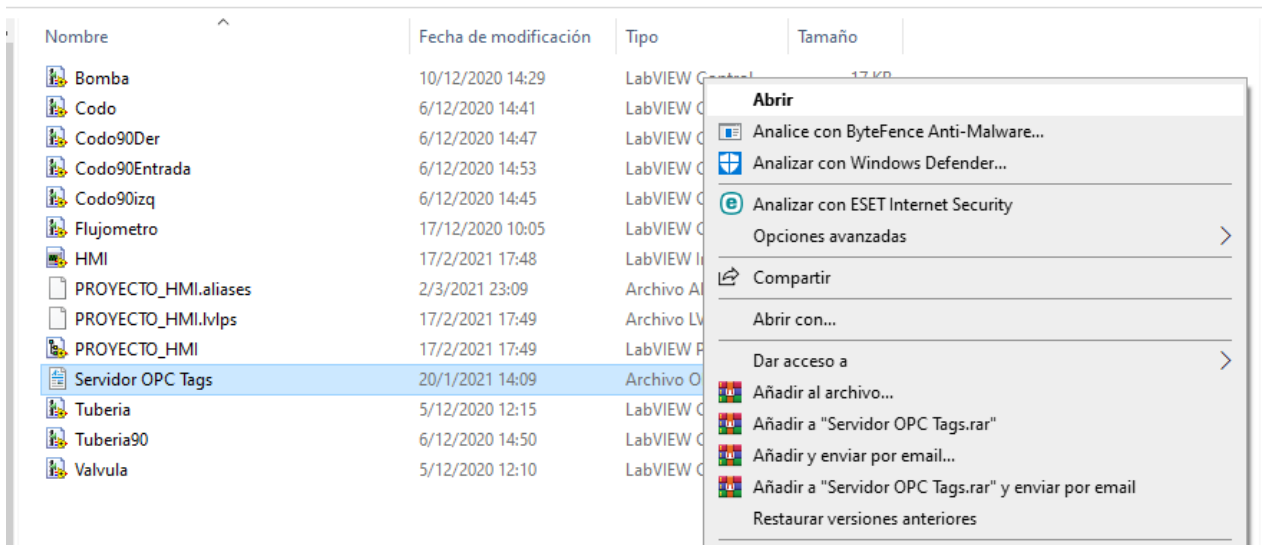
Luego de elegir esta opción se debe dar clic en el botón conectar para que se realice la conexión entre el plc simulado y la planta simulada; al realizarse la conexión nos aparecerá un visto y la palabra conectar se reemplaza por la palabra desconectar



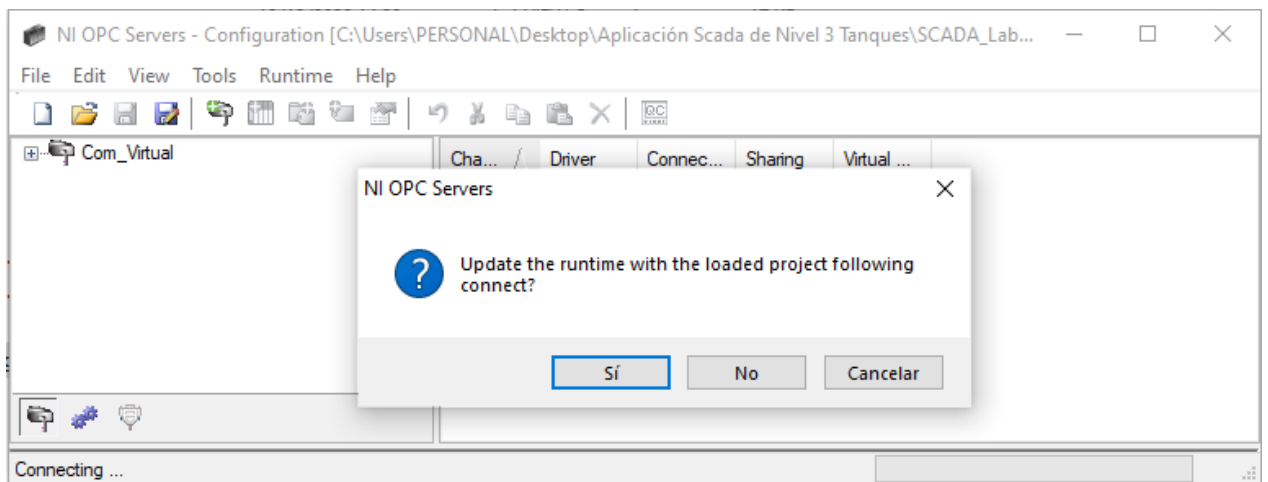
Una vez realizada esta conexión, se procede a crear una conexión (servidor -cliente) entre NetToPLCsim y NI OPC

Paso 8.- En la carpeta “SCADA_LabVIEW” se ejecuta “Servidor OPC Tags”

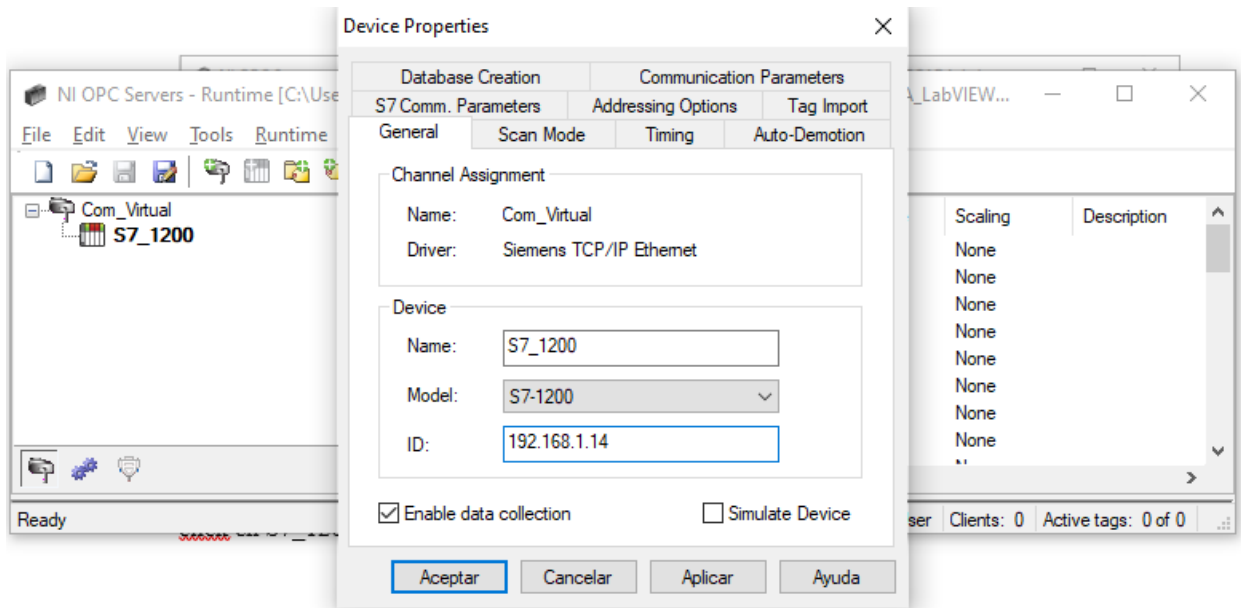
Aplicación Scada de Nivel 3 Tanques > SCADA_LabVIEW



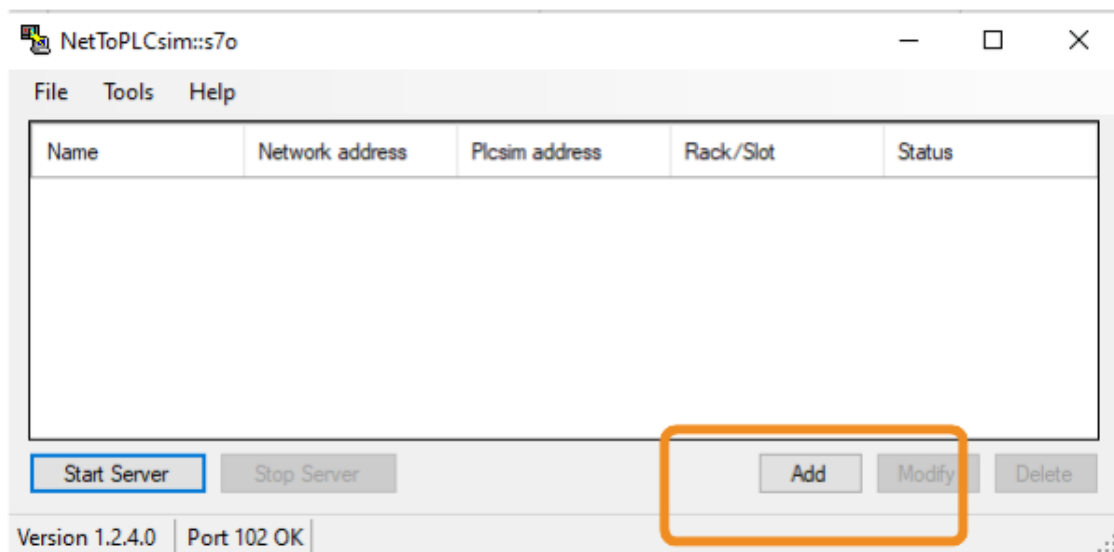
A continuación, se abre el programa y se despliega el siguiente mensaje que se lo acepta dando clic en el botón “Sí”



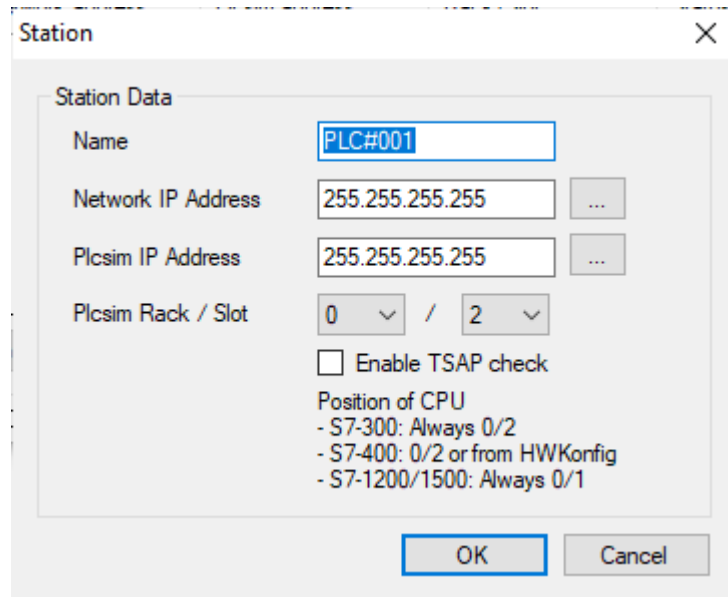
Luego se procede a configurar la dirección IP haciendo clic en el símbolo de (+); y luego doble clic en S7_1200



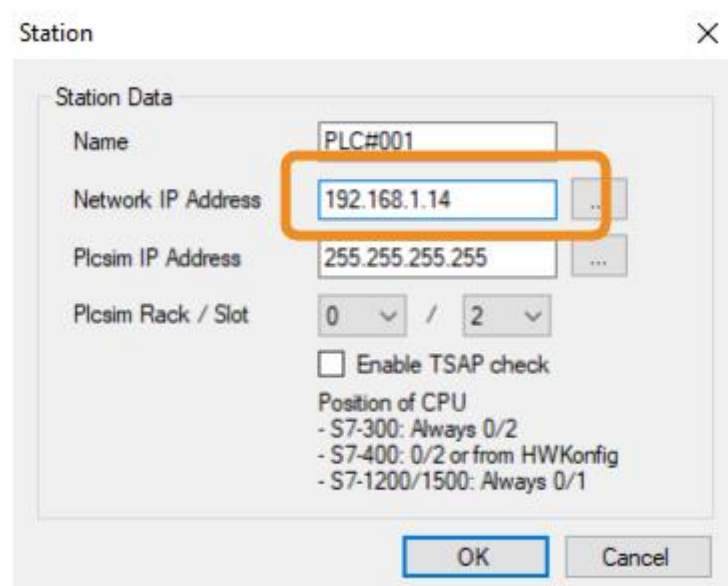
De esta forma queda configurado el OPC y procedemos a crear un servicio en NetToPLCsim dando clic en el botón “add”



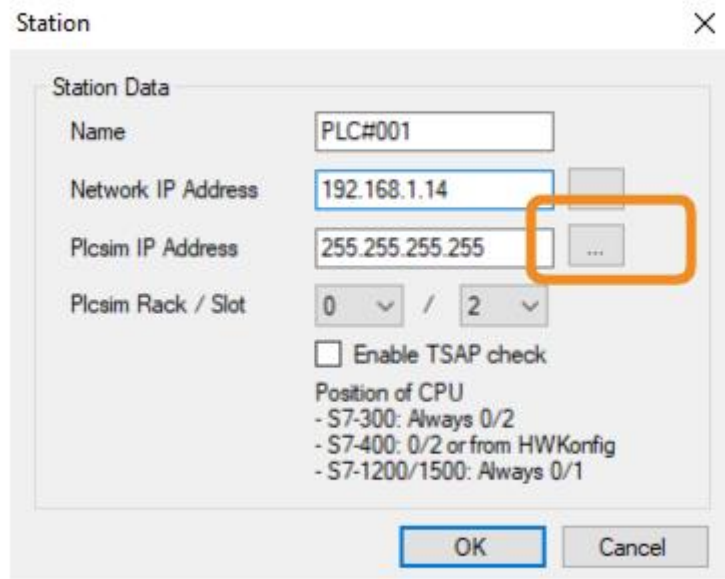
Ajustamos manualmente las direcciones que aparecen por defecto



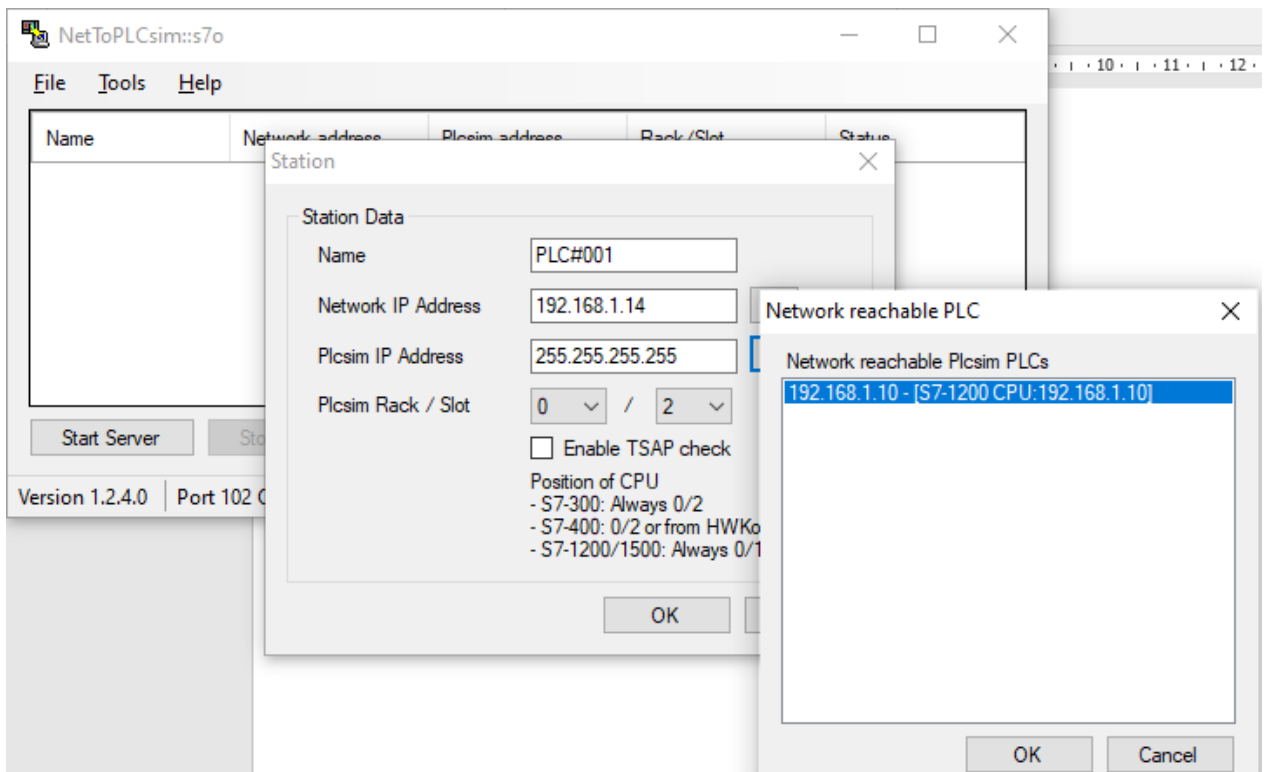
En “Network IP Address” se configura la misma dirección IP del servidor OPC establecida en este caso (192.168.1.14)



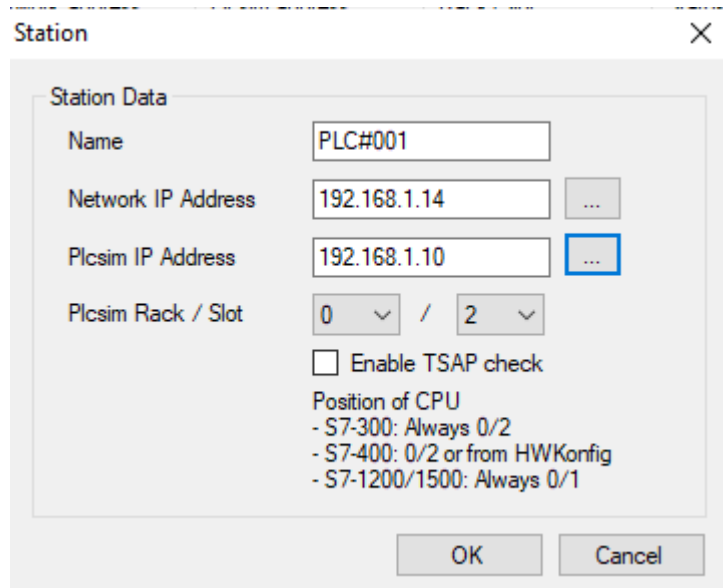
Para configurar la dirección del plc se da clic en el siguiente botón



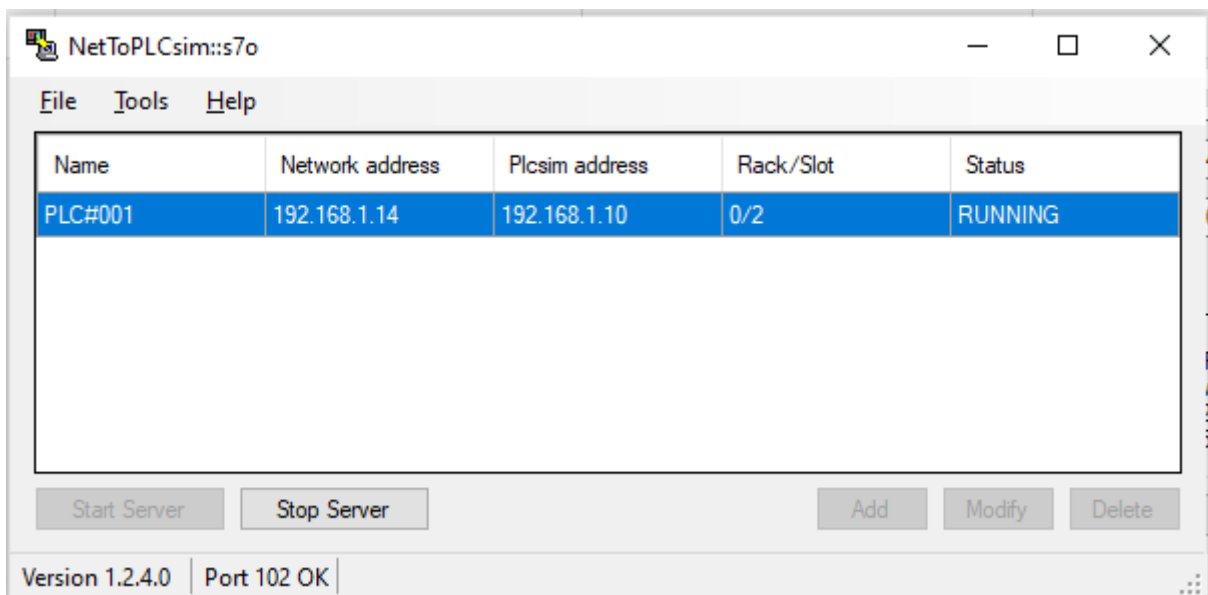
Lo cual despliega un listado de los PLC´s activos en ese momento y se selecciona el que hemos cargado el algoritmo previamente es decir 192.168.1.10



Posteriormente se da clic en OK y la configuración queda de la siguiente manera



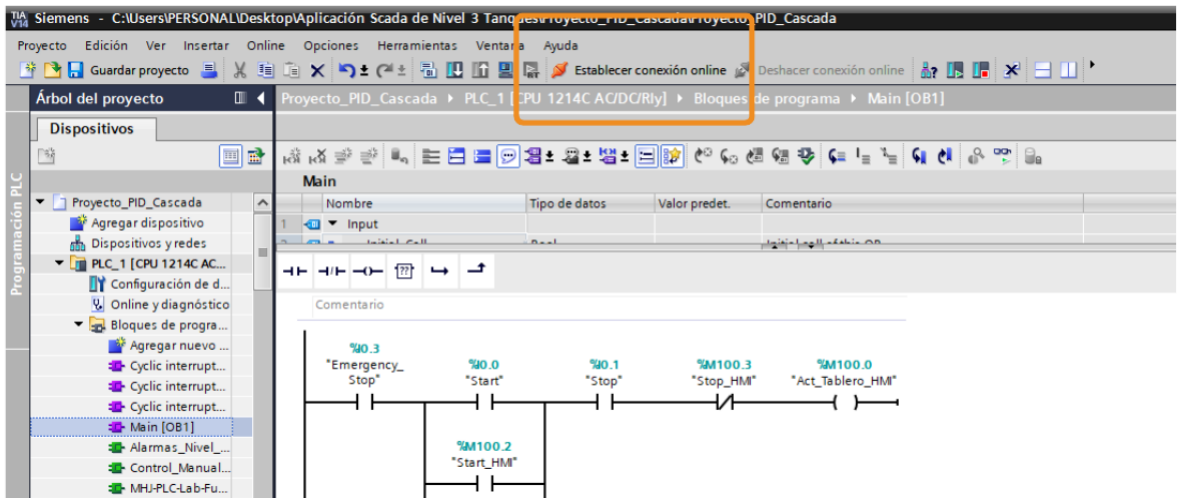
Al dar clic en OK esta ventana se cierra y nos aparece ya agregada la estación y se debe dar clic en el botón “Start Server” y su estado cambia a modo “RUNNING”



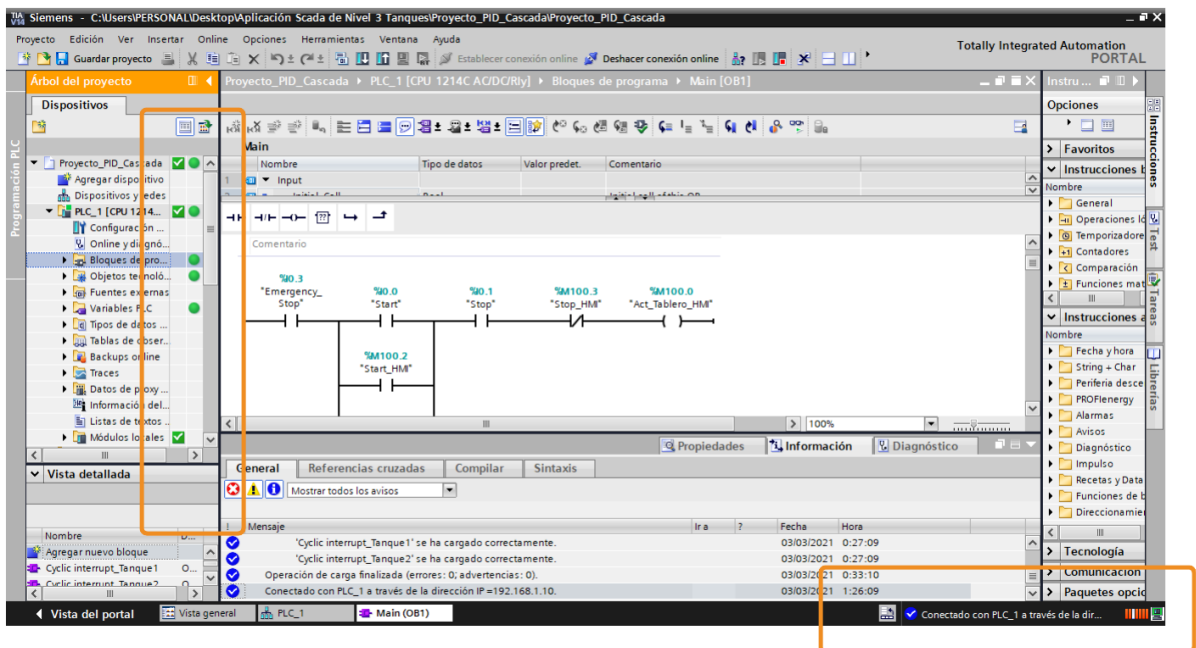
4. FUNCIONAMIENTO

Una vez realizados todos los pasos anteriores se procede con la operación de la aplicación SCADA simultáneamente con las otras herramientas de Software

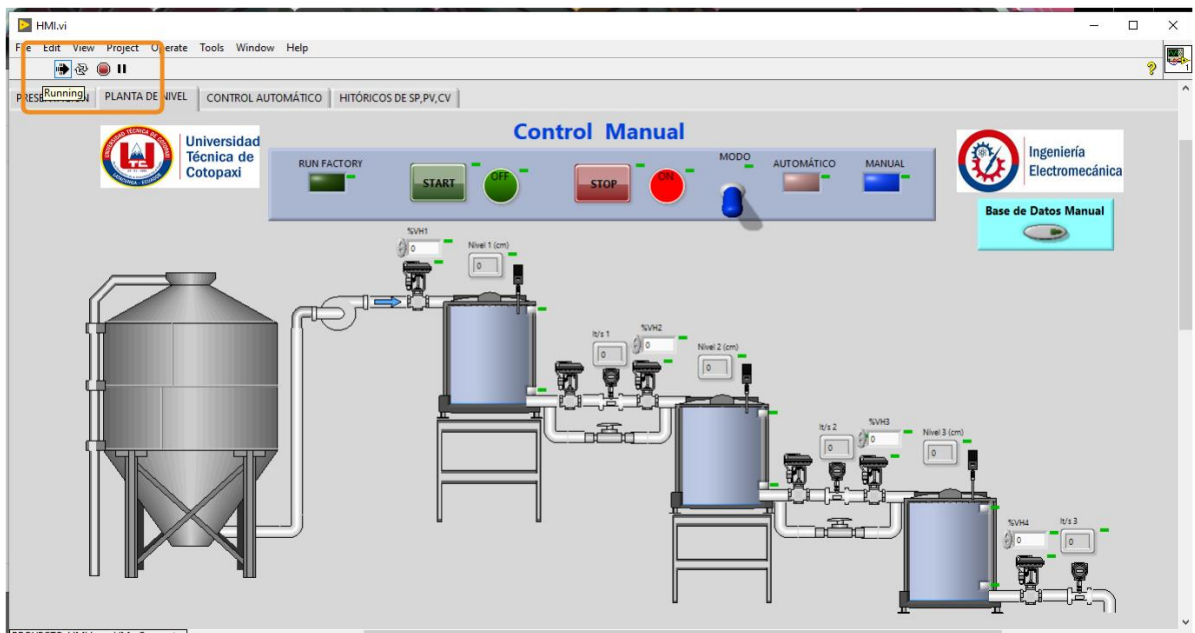
Paso9.- En el Software TIA portal se establece la conexión online con el PLCsim haciendo clic en el siguiente botón



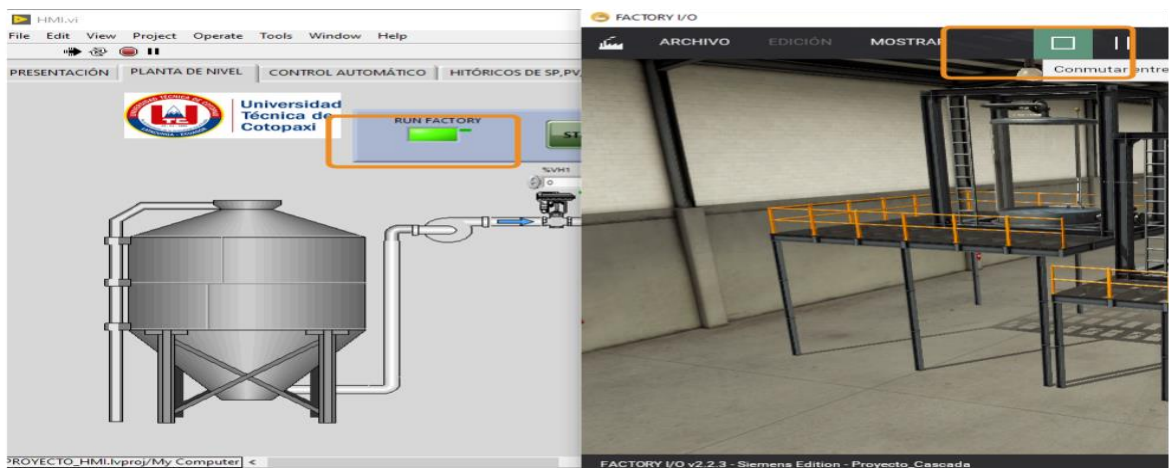
Al establecerse la conexión nos aparece unos indicadores en el Árbol del proyecto que serán de color verde en el caso de no existir errores y naranjas si los hay; además en la parte inferior se despliega un mensaje con la indicación de que se ha realizado la conexión.



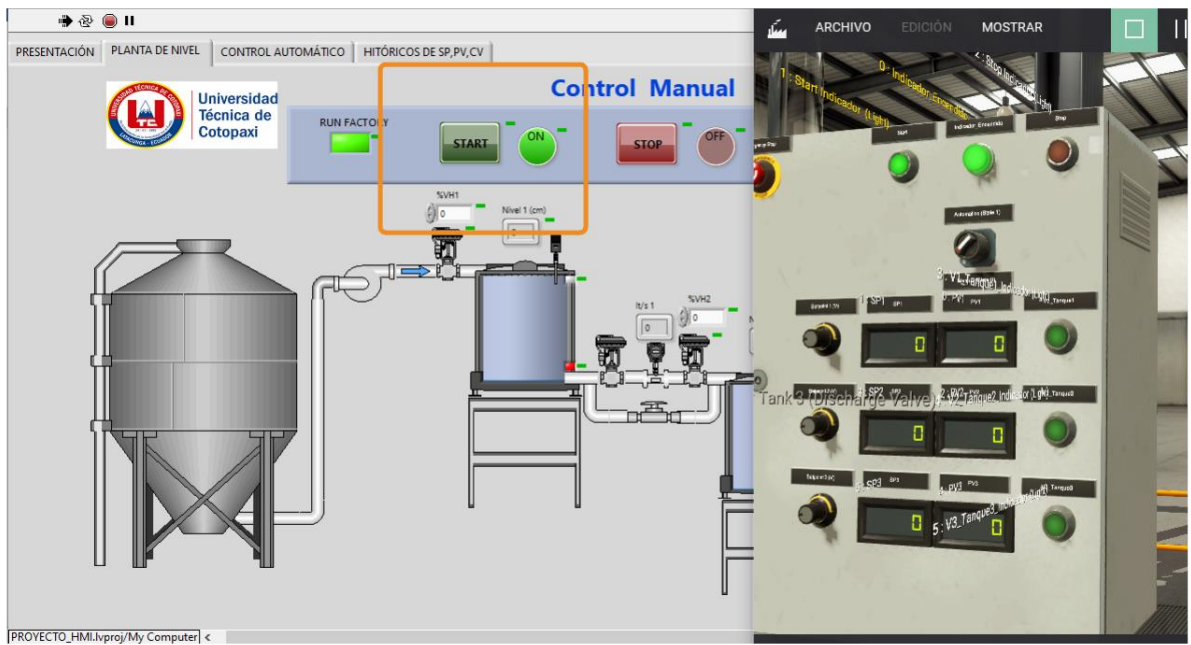
Paso 10.- En la aplicación SCADA se debe cambiar de estado a modo RUN



Al cambiar de al modo RUN el software de simulación de la planta se puede notar como el indicador en la aplicación se enciende



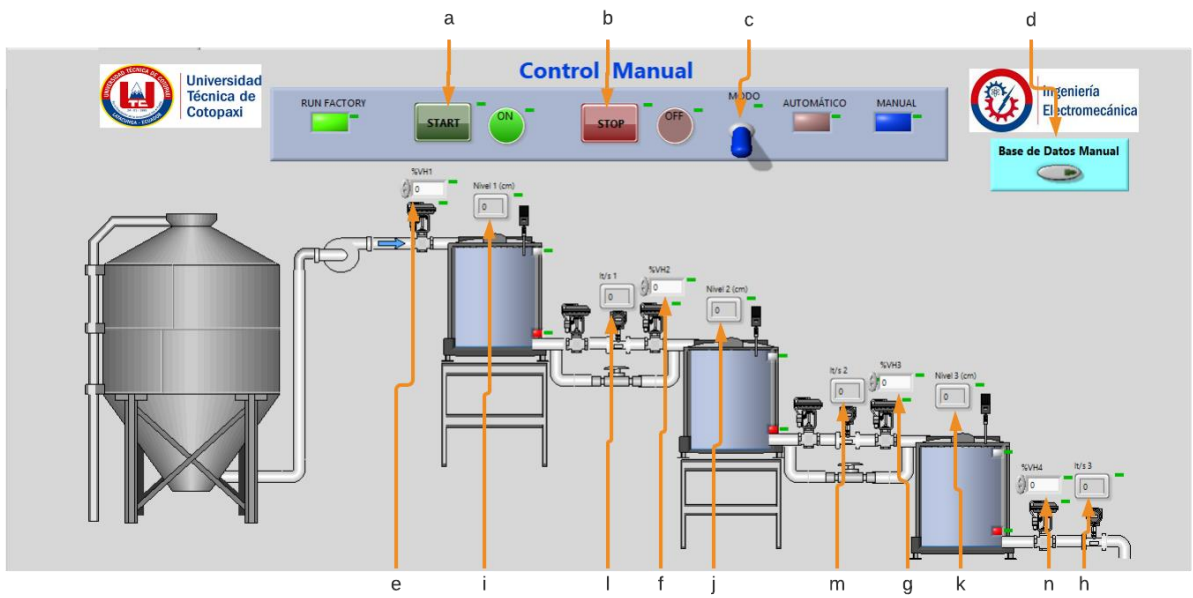
Al hacer clic en el botón “START” el sistema se inicia y se encienden los indicadores en los dos softwares



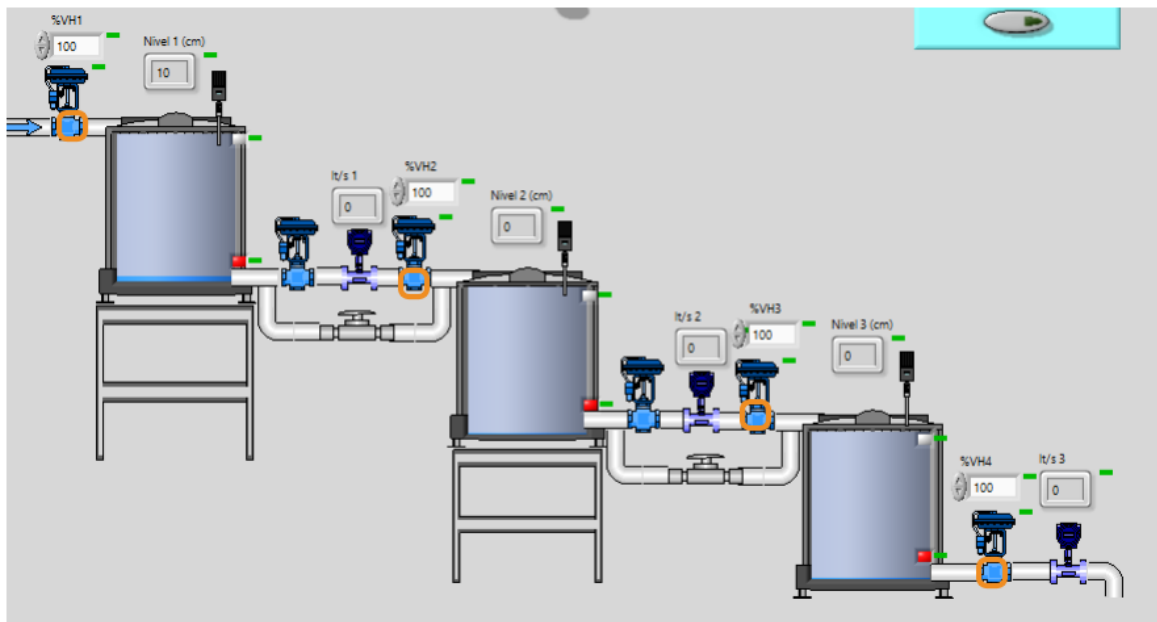
4.1 MODO DE OPERACIÓN MANUAL

Al iniciar el sistema esté se encuentra por defecto en modo manual en el cual se tiene las siguientes partes:

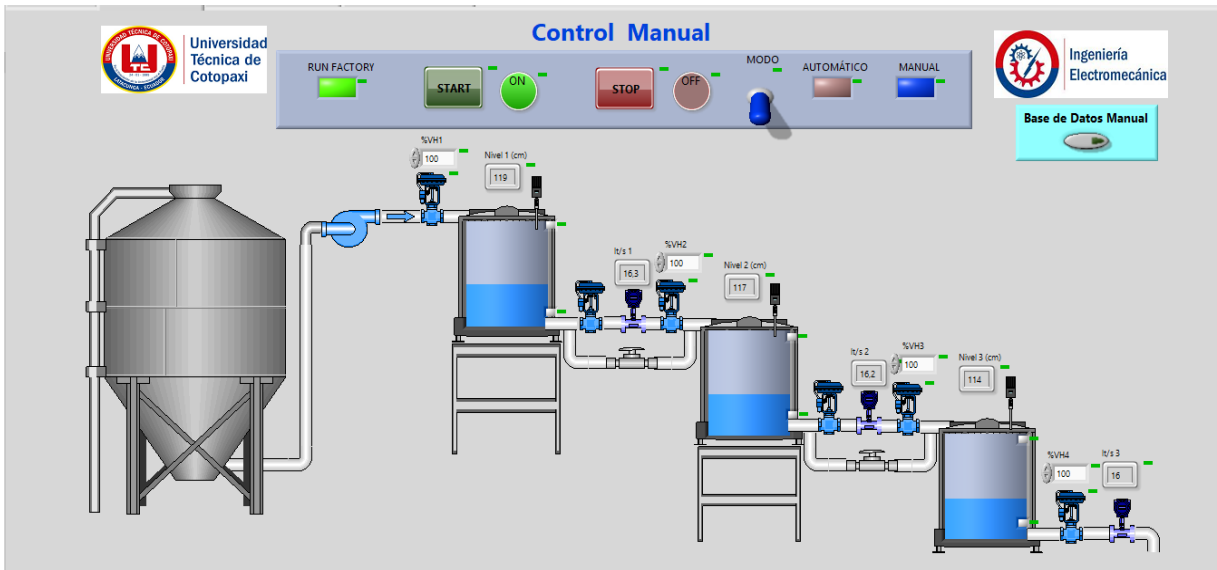
- a) Botón de inicio
- b) Botón de paro
- c) Selector de modo de operación de la planta
- d) Botón de registro de datos Manual
- e) Apertura de la válvula 1
- f) Apertura de la válvula 2
- g) Apertura de la válvula 3
- h) Apertura de la válvula de perturbación
- i) Indicador de nivel Tanque 1
- j) Indicador de nivel Tanque 2
- k) Indicador de nivel Tanque 3
- l) Flujo metro 1
- m) Flujo metro 2
- n) Flujo metro 3



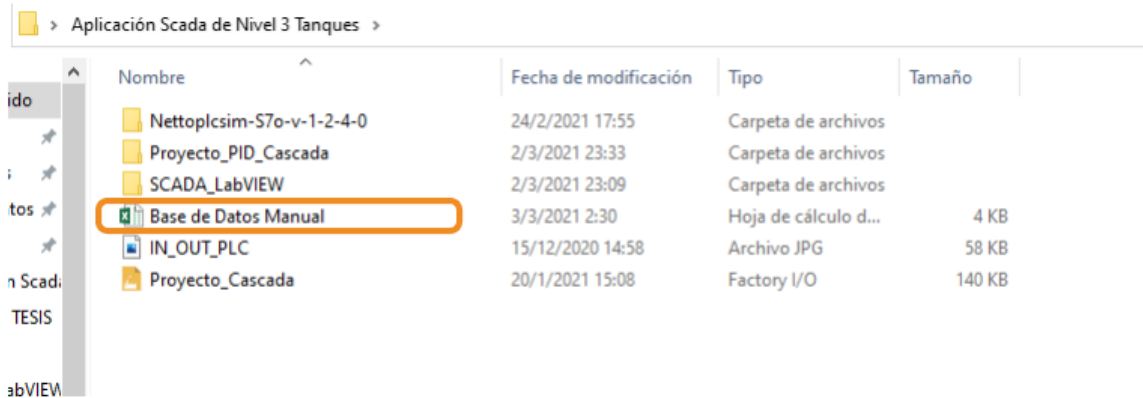
En modo manual se puede variar la apertura de las válvulas y para activarlas se debe hacer clic sobre la parte que se indica



Luego de un tiempo se obtiene lo siguiente en la aplicación SCADA y en la Simulación de la Planta



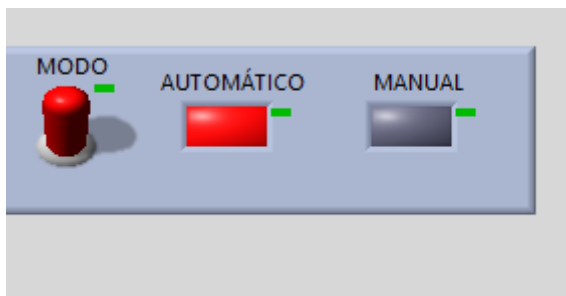
Para obtener datos del proceso en modo manual se debe hacer clic sobre el botón indicado y ahora se observa en la dirección indicada que se ya se creó el archivo de registro



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Time	Valvula 1(%)	Nivel T1(cm)	Flujo T1(Lt/s)	Valvula 2-3 (%)	Nivel T2(cm)	Flujo T2(Lt/s)	Valvula 4-5 (%)	Nivel T3(cm)	Flujo T3(Lt/s)	Valvula 6 (%)	
2	#####	100	142	17,886286	100	142	17,859013	100	142	17,830803	100	
3	#####	100	143	17,892866	100	142	17,865597	100	142	17,838324	100	
4												
5												
6												
7												

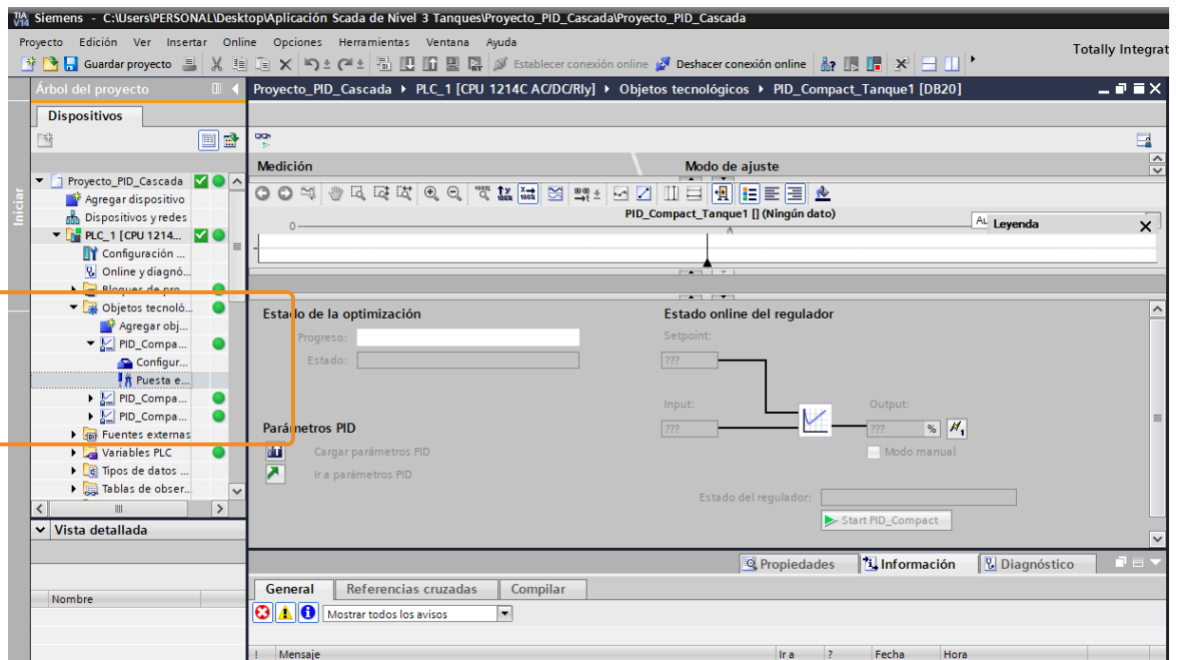
4.2 MODO DE OPERACIÓN AUTOMÁTICO

Para cambiar de modo se debe desactivar las válvulas del modo manual; excepto la de la perturbación ya que esta seguirá afectando al proceso y se cambia el selector al modo automático para que el sistema realice las operaciones de control por el autómatas.

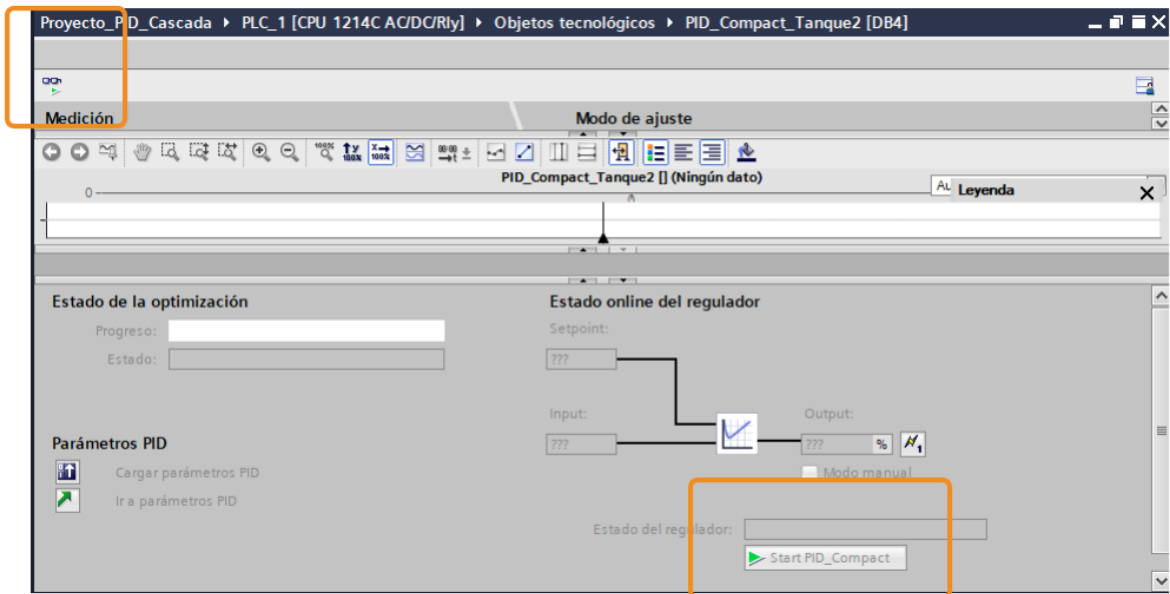


A continuación, se procede a encender los objetos tecnológicos PID en el software TIA Portal, debido a que se trata de un PLC simulado. Para hacer esto se dirige al árbol del proyecto, seleccionar la opción Objetos tecnológicos/ PID_COMPACT/PUESTA EN SERVICIO.

Este proceso se debe realizar para cada uno de los controladores.



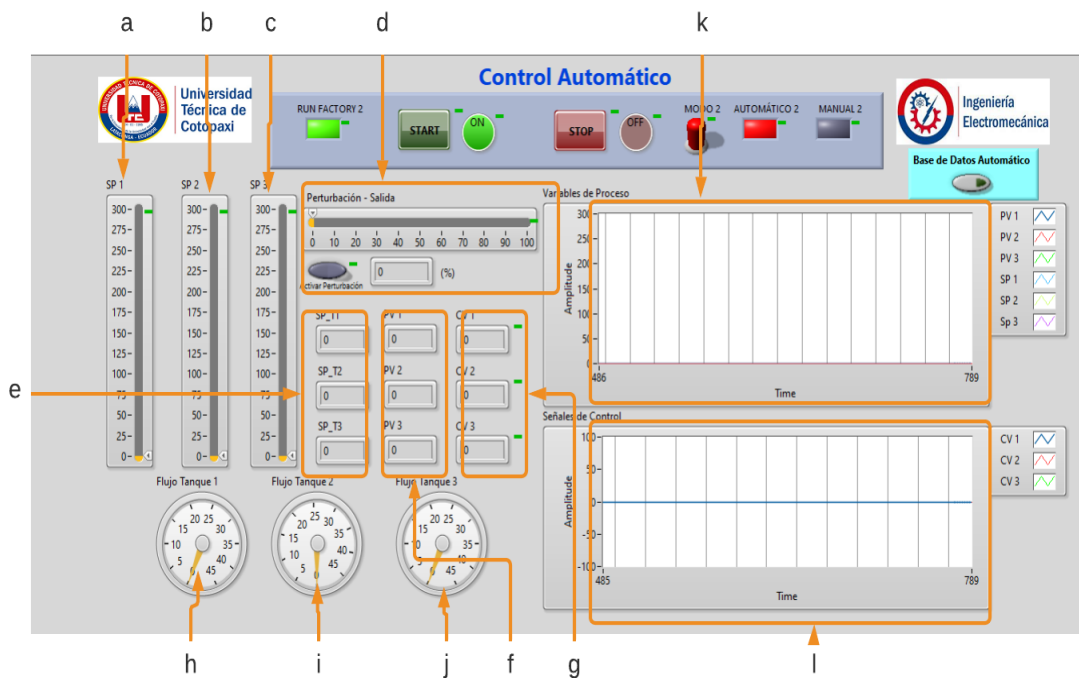
Luego se procede a encender estos objetos tecnológicos presionando primero donde se indica el recuadro superior y de manera seguida el botón que se indica en el recuadro inferior



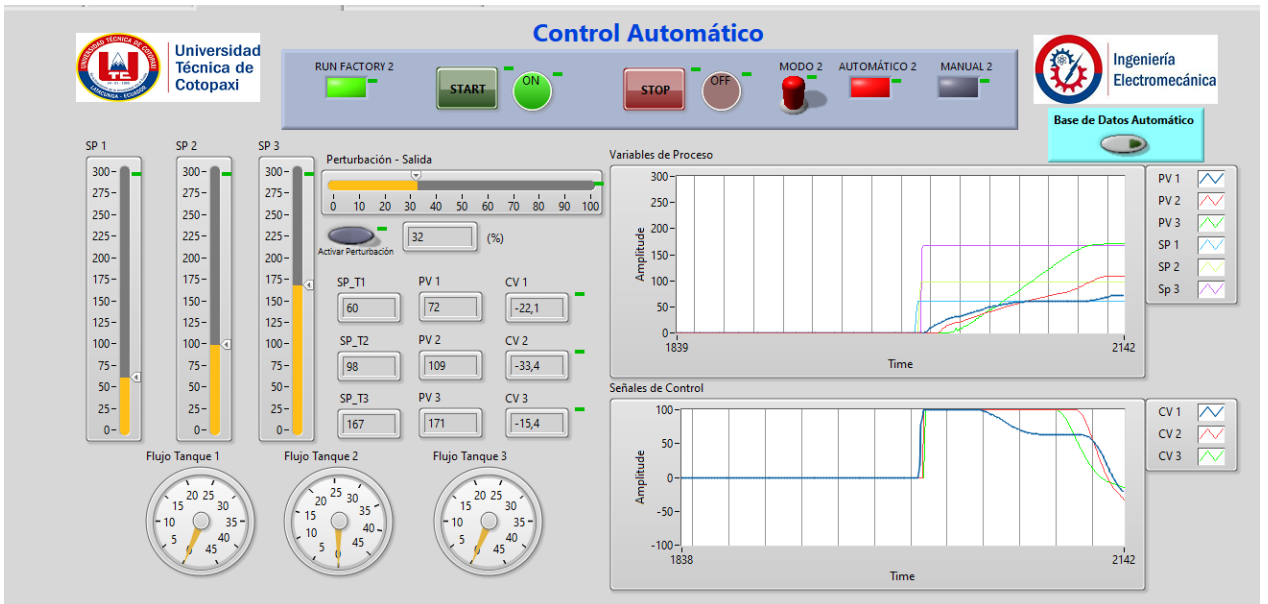
A continuación, se debe dirigir a la pestaña “Modo Automático” que consta de las siguientes partes:

- a) Control Set point Tanque 1
- b) Control Set point Tanque 2
- c) Control Set point Tanque 3

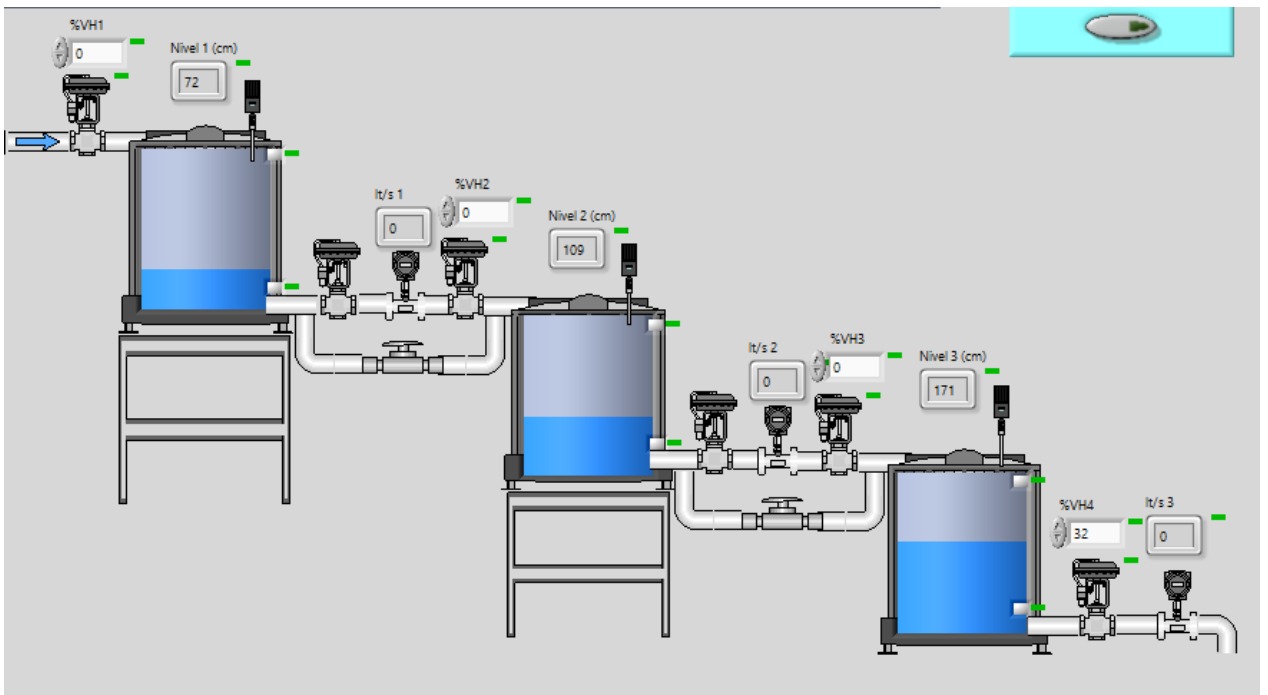
- d) Control e indicador de Perturbación
- e) Indicadores de Set point´s
- f) Indicadores de las variables del proceso
- g) Indicadores de las variables de control
- h) Flujometro 1
- i) Flujometro 2
- j) Flujometro 3
- k) Curvas de SP y VP
- l) Curvas de CV



Al ajustar los valores deseados en las barras de set point para cada tanque y ajustar un valor deseado para la perturbación se puede apreciar que la curva de manera automática interpreta los cambios de estado para cada variable.



Así se puede apreciar los cambios de nivel en cada tanque tanto en el panel grafico de la aplicación SCADA como en el tablero de simulación de la planta

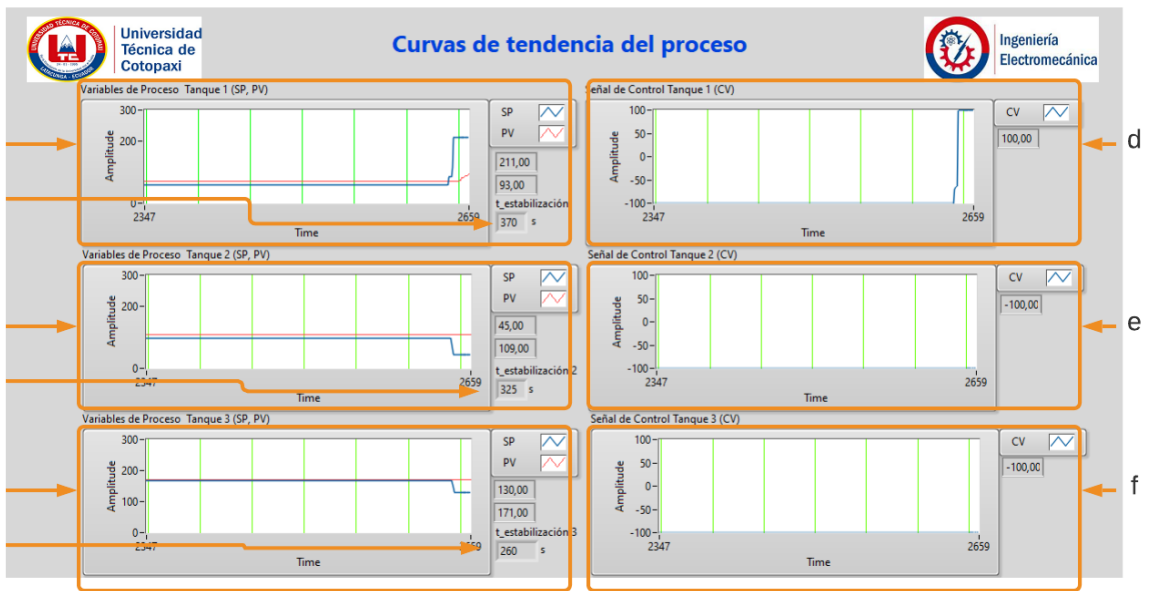




5. INTERPRETACIÓN

En la pestaña número 4 se puede apreciar las curvas de tendencia del proceso y consta de las siguientes partes:

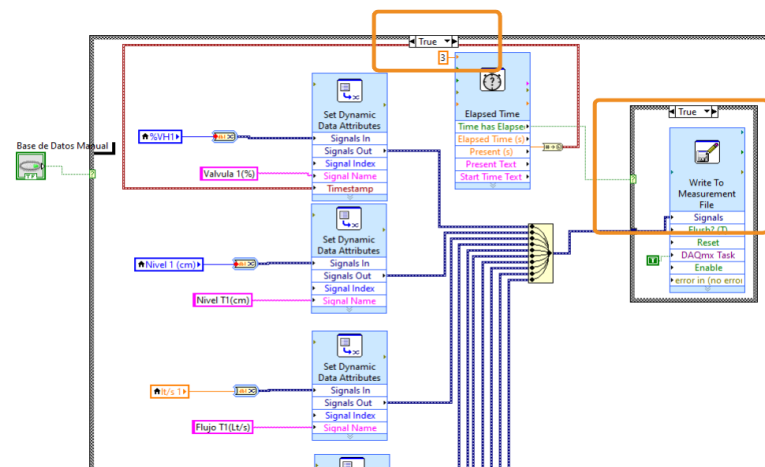
- a) Curvas de Set point y Variable del proceso; e indicadores del tanque 1
- b) Curvas de Set point y Variable del proceso; e indicadores del tanque 2
- c) Curvas de Set point y Variable del proceso; e indicadores del tanque 3
- d) Curva de la variable de control del tanque 1
- e) Curva de la variable de control del tanque 2
- f) Curva de la variable de control del tanque 3
- g) Tiempo de estabilización del primer tanque
- h) Tiempo de estabilización del segundo tanque
- i) Tiempo de estabilización del tercer tanque



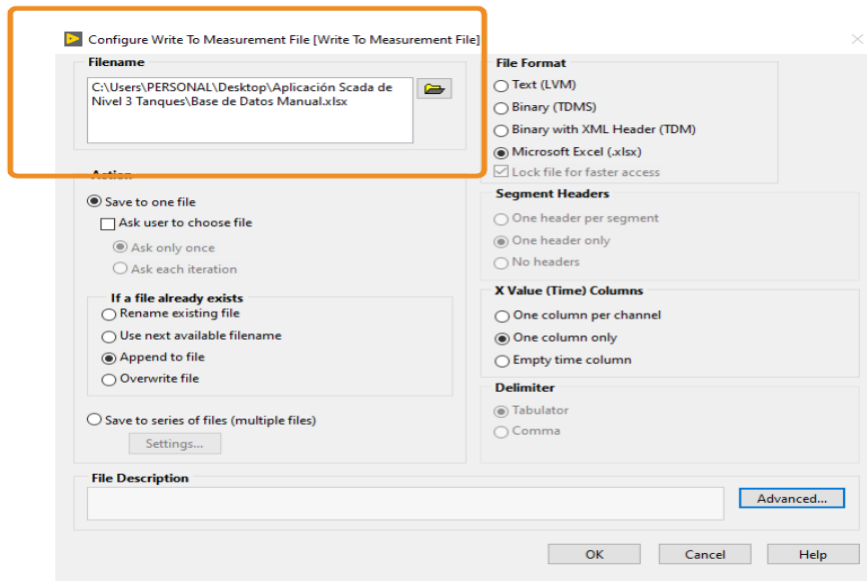
6. ADQUISICION DE DATOS

Para obtener datos en una hoja de cálculo tanto en modo manual como automático se debe cambiar la dirección de donde se creará el archivo ya que por defecto está dirección está relacionada al pc donde se creó el programa

Paso 20.- Abrir el panel de programación en la aplicación SCADA (CTRL+T) y dirigirse hacia el apartado "Write to Measurement File"; notar que tanto para los dos modos deberá estar en la condición de True y se debe realizar el mismo cambio para los dos modos



Al hacer doble clic en "Write to Measurement File"; se despliega el siguiente panel de configuración



Esta dirección se debe cambiar haciendo clic en el icono de la carpeta que nos permite escoger la ruta donde se va a generar la hoja de cálculo con el registro de datos.

