



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
DIDÁCTICO PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS SOBRE  
CONTROL AVANZADO DE PROCESOS INDUSTRIALES.**

**AUTORES: CÁRDENAS QUINTANA, ANDRÉS ISRAEL  
JIMÉNEZ LEÓN, ICLER PAUL**

**DIRECTOR: ING: PRUNA PANCHI, EDWIN PATRICIO**

**LATACUNGA**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS SOBRE CONTROL AVANZADO DE PROCESOS INDUSTRIALES”*** fue realizado por los señores **Cárdenas Quintana Andrés Israel y Jiménez León Icler Paul**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 13 de Noviembre del 2018

---

**Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio**

C. C 0502651003



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Cárdenas Quintana, Andrés Israel y Jiménez León, Icler Paul**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo veraz.

Latacunga, 13 de Noviembre del 2018

---

Cárdenas Quintana, Andrés Israel

Jiménez León, Icler Paul

C.C.: 0503802563

C.C.: 0504349531



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Cárdenas Quintana, Andrés Israel y Jiménez León, Icler Paul**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el presente trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 13 de Noviembre del 2018

---

Cárdenas Quintana, Andrés Israel

Jiménez León, Icler Paul

C.C.: 0503802563

C.C.: 0504349531

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de finalización a mi etapa universitaria, a mi madre que ha sido toda mi vida mi mayor orgullo, y motivación cada día para ser una mejor persona, y junto a mis hermanas que han dado todo de ellas para apoyarme en cualquier momento para salir adelante. Esta meta cumplida es un orgullo para mí y una forma de demostrar mi agradecimiento por todo su apoyo y confianza puestos en mí.

Andrés Israel Cárdenas Quintana

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Rómulo Jiménez y Martha León que gracias a su amor, dedicación y esfuerzo diario han logrado hacer de mí una persona humilde y respetuosa. A mi hermana Nicole, con quien he compartido momentos y experiencias inolvidables en casa. A Gissela por ser la chica más linda del mundo, porque esa linda mirada y sonrisa es realmente lo que me inspira a que nada me sea imposible, gracias por ser parte de mi vida.

Icler Paul Jiménez León

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre por brindarme todo su apoyo en estos años de estudios, por su sacrificio, tiempo y paciencia que tuvo hacia mí, y demostrarme que las carencias de algunas cosas nunca son limitaciones para alcanzar lo que nos proponemos. A mis hermanas a las cuales admiro mucho por ser unas excelentes personas que nunca me abandonaron cuando más lo necesite y siempre las tomaba como ejemplo de superación. Para mi padre por ese apoyo en mis momentos de educación. A mi novia por formar equipo conmigo, siendo mi compañía y apoyo en todo momento. A mi compañero de tesis y a mi tutor del presente trabajo, los cuales me han compartido sus conocimientos y amistad mientras se desarrollaba el proyecto. Y a mis amigos quienes siempre me dieron una mano cuando lo necesitaba y querían verme triunfando en la vida, muchas gracias a todos.

Andrés Israel Cárdenas Quintana

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Virgen Dolorosa, por ser mi luz y mi guía, por brindarme sabiduría y darme su bendición.

A mis padres por el esfuerzo realizado para darme la oportunidad de estudiar y poder culminar con mi carrera; por el apoyo permanentemente que me brindaron durante toda mi vida estudiantil. A mi hermana y a toda mi familia por impulsarme a culminar mis estudios.

Al Ing. Edwin Pruna, tutor del presente trabajo de investigación; por compartir sus conocimientos, brindarme su apoyo y amistad en todo el tiempo de desarrollo del proyecto.

A todas esas personas que de una u otra manera estuvieron presentes en esta gran experiencia de mi vida estudiantil, gracias por su amistad brindada.

Icler Paul Jiménez León



# ÍNDICE DE CONTENIDO

## PORTADA

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	iv
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
AGRADECIMIENTO .....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT .....	xviii

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Antecedentes .....	1
1.3 Justificación e Importancia.....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Variables de la investigación .....	3
1.5.1 Variable Independiente.....	3
1.5.2 Variable Dependiente .....	4
1.6 Hipótesis .....	4

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos .....	5
2.2 Fundamentación Teórica .....	5

2.2.1	Control de procesos .....	5
2.2.2	Control Avanzado de procesos .....	7
2.2.3	Tipos de Procesos industriales .....	11
2.2.4	Métodos de sintonización.....	14
2.2.5	Métodos de sintonización para procesos autorregulados. ....	15
2.2.6	Métodos de sintonización para procesos integrantes. ....	16
2.2.7	Hardware-in-the-Loop.....	18
2.2.8	Paradigmas de simulación HIL.....	19
2.2.9	PLC.....	20
2.2.10	PLC S7 1200.....	20
2.2.11	LabVIEW.....	25
2.2.12	DAQ.....	28
2.2.13	NI DAQ 6008.....	28

### **CAPÍTULO III**

#### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

3.1	Identificación de la dinámica del proceso nivel y caudal.....	30
3.1.1	Proceso autorregulado caudal .....	32
3.1.2	Proceso integrante nivel.....	34
3.2	Configuración del dispositivo NI DAQ 6008.....	35
3.2.1	Adquirir señales analógicas en NI-DAQ 6008 .....	37
3.2.2	Generar señales analógicas en NI-DAQ 6008 .....	39
3.3	Diseño del HMI del simulador.....	42
3.3.1	Pantalla principal .....	42
3.3.2	Menú de selección de estaciones de procesos.....	43
3.3.3	HMI de las estaciones de procesos.....	45
3.4	Estación de nivel para control PID.....	46
3.8	Diseño de controladores .....	56
3.8.1	Control proporcional integral derivativo para la estación nivel.....	56
3.8.2	Control en cascada para la estación de nivel .....	60
3.8.3	Control en adelanto para la estación de nivel.....	63
3.8.4	Control en relación para la estación de flujo .....	67
3.9	Diseño y elaboración del módulo didáctico .....	70

3.9.1	Diagramas del panel frontal.....	70
3.9.2	Conexión interna del módulo didáctico .....	71

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y RESULTADOS**

4.1	Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel .....	75
4.2	Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel ante perturbaciones.....	77
4.3	Respuesta del control en relación para el sistema de control de flujos.....	79
4.4	Comprobación de la hipótesis .....	82
4.5	Alcances .....	85
4.6	Limitaciones .....	86

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	87
5.2	Recomendaciones.....	88

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	89
---	----

<b>ANEXOS</b> .....	91
---------------------	----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso autorregulado.....</i>	15
<b>Tabla 2</b>	<i>Métodos de sintonía para un controlador PID en un proceso autorregulado.....</i>	16
<b>Tabla 3</b>	<i>Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso integrante.....</i>	16
<b>Tabla 4</b>	<i>Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso integrante.....</i>	17
<b>Tabla 5</b>	<i>Partes del PLC S7-1200.....</i>	21
<b>Tabla 6</b>	<i>Medición del transmisor de caudal .....</i>	73
<b>Tabla 7</b>	<i>Respuesta del variador de velocidad.....</i>	74
<b>Tabla 8</b>	<i>Medición del transmisor de nivel .....</i>	74
<b>Tabla 9</b>	<i>Respuesta de la válvula proporcional.....</i>	75
<b>Tabla 10</b>	<i>Comparación de las estrategias de control para la variable nivel.....</i>	76
<b>Tabla 11</b>	<i>Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-1 en el proceso nivel.....</i>	78
<b>Tabla 12</b>	<i>Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-2 en el proceso nivel.....</i>	79
<b>Tabla 13</b>	<i>Sintonía de controladores para el Flujo maestro .....</i>	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Control de proceso asistido por un humano.....	6
<b>Figura 2.</b> Control de proceso automático .....	6
<b>Figura 3.</b> Diagrama de bloques de las variables que llegan al proceso .....	8
<b>Figura 4.</b> Control anticipativo.....	9
<b>Figura 5.</b> Diagrama de bloques de un control en cascada .....	10
<b>Figura 6.</b> Control relacional .....	10
<b>Figura 7.</b> Control en relación con dos bucles. ....	11
<b>Figura 8.</b> Respuesta dinámica de un proceso autorregulado .....	12
<b>Figura 9.</b> Respuesta dinámica de un proceso integrante .....	13
<b>Figura 10.</b> Sistema de control realimentado.....	14
<b>Figura 11.</b> Sistema de simulación Hardware-in-the-Loop .....	18
<b>Figura 12.</b> Componentes de un simulador HIL basado en PC .....	19
<b>Figura 13.</b> Simulador HIL Basado en un sistema embebido .....	20
<b>Figura 14.</b> PLC S7-1200 .....	21
<b>Figura 15.</b> Programación en el bloque principal del TIA PORTAL .....	23
<b>Figura 16.</b> Bloque PID_Compact.....	24
<b>Figura 17.</b> Software LabVIEW .....	25
<b>Figura 18.</b> Ejemplo de panel frontal de LabVIEW .....	26
<b>Figura 19.</b> Ejemplo de diagrama de bloques.....	27
<b>Figura 20.</b> Software NI OPC Server .....	28
<b>Figura 21.</b> Terminales de entrada y salida de la NI DAQ 6008 .....	29
<b>Figura 22.</b> Sistema implementado.....	30
<b>Figura 23.</b> HMI para obtener la dinámica del proceso.....	31
<b>Figura 24.</b> Diagrama a bloques para obtención de la dinámica de los procesos .....	32
<b>Figura 25.</b> Dinámica del proceso caudal .....	32
<b>Figura 26.</b> Creación de vectores .....	33
<b>Figura 27.</b> Ventana de importación de datos.....	33
<b>Figura 28.</b> Ventana de identificación del modelo.....	34

<b>Figura 29.</b> Dinámica del proceso nivel .....	35
<b>Figura 30.</b> Ventana de NI-MAX .....	36
<b>Figura 31.</b> Acceso al DAQ Assistant desde el diagrama de bloques .....	36
<b>Figura 32.</b> DAQ Assistant.....	37
<b>Figura 33.</b> Selección del canal de medida en el hardware .....	38
<b>Figura 34.</b> Configuración para adquisición de datos .....	39
<b>Figura 35.</b> DAQ Assistant Configurado para adquisición de datos.....	39
<b>Figura 36.</b> Selección del canal de salida en el hardware .....	40
<b>Figura 37.</b> Configuración para escritura de datos .....	41
<b>Figura 38.</b> DAQ Assistant Configurado para escritura de datos.....	41
<b>Figura 39.</b> Diagrama de bloques del HMI del simulador de procesos industriales.....	42
<b>Figura 40.</b> HMI de la pantalla principal.....	43
<b>Figura 41.</b> HMI del menú de selección del proceso .....	43
<b>Figura 42.</b> Diagrama de bloques del menú de selección del proceso.....	44
<b>Figura 43.</b> Diagrama de bloques del subVI OPEN .....	45
<b>Figura 44.</b> Diagrama de bloques del subVI CLOSE .....	45
<b>Figura 45.</b> HMI de simulación de una de la estación de procesos .....	46
<b>Figura 46.</b> HMI de la estación de control de nivel .....	46
<b>Figura 47.</b> DB del HMI de la estación de nivel para control PID.....	47
<b>Figura 48.</b> Lazo de simulación de la dinámica del proceso.....	48
<b>Figura 49.</b> Lazo de alarmas y sonidos .....	49
<b>Figura 50.</b> Creación de un nuevo control .....	49
<b>Figura 51.</b> Personalización de un control .....	50
<b>Figura 52.</b> Dibujo de un transmisor en Solidworks .....	51
<b>Figura 53.</b> Exportar modelos 3D a LabVIEW .....	51
<b>Figura 54.</b> Asignar color a un objeto 3D .....	52
<b>Figura 55.</b> Escena tridimensional de la estación .....	52
<b>Figura 56.</b> SubVI de escena tridimensional.....	53
<b>Figura 57.</b> Herramientas de transformación para objetos 3D en LabVIEW.....	54
<b>Figura 58.</b> Animación de objetos tridimensionales .....	54

<b>Figura 59.</b> HMI de la estación de control de nivel método cascada .....	55
<b>Figura 60.</b> HMI de la estación de control de nivel método en adelanto.....	56
<b>Figura 61.</b> Diagrama P&ID del control PID para la estación de nivel .....	57
<b>Figura 62.</b> Diagrama de bloques del control PID.....	58
<b>Figura 63.</b> Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas. .....	59
<b>Figura 64.</b> Bloque PID para el Control PID .....	59
<b>Figura 65.</b> Diagrama P&ID del control en cascada para la estación de nivel..	60
<b>Figura 66.</b> Diagrama de bloques del control en cascada .....	61
<b>Figura 67.</b> Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas para el control en cascada.....	62
<b>Figura 68.</b> Bloque PID del lazo Primario .....	62
<b>Figura 69.</b> Bloque PID del lazo secundario .....	63
<b>Figura 70.</b> Control en adelanto para la estación de nivel. ....	64
<b>Figura 71.</b> Diagrama de bloques del control en adelanto.....	65
<b>Figura 72.</b> Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas para el control en adelanto. ....	65
<b>Figura 73.</b> Bloque PID del lazo primario con la señal de anticipación.....	66
<b>Figura 74.</b> Bloque PID del lazo secundario para el control en adelanto.....	67
<b>Figura 75.</b> Diagrama P&ID del control en relación para la estación de flujo ...	67
<b>Figura 76.</b> Diagrama de bloques del control en relación .....	68
<b>Figura 77.</b> Normalización y escalamiento de las señales para el control en relación. ....	69
<b>Figura 78.</b> Bloque PID del flujo A. ....	69
<b>Figura 79.</b> Bloque PID del flujo B .....	70
<b>Figura 80.</b> Módulo didáctico (a) Diseño, (b) Implementación .....	70
<b>Figura 81.</b> Diagramas del panel frontal .....	71
<b>Figura 82.</b> Conexión interna entre DAQ y el módulo didáctico.....	72
<b>Figura 83.</b> Respuesta de los controles PID, cascada y adelanto .....	76
<b>Figura 84.</b> Señales de los lazos de control de la variable nivel ante la perturbación de la V1 .....	77

<b>Figura 85.</b> Señales de los lazos de control de la variable nivel ante la perturbación de la V-2 .....	78
<b>Figura 86.</b> Métodos de sintonía aplicados al sistema de control de flujo maestro .....	80
<b>Figura 87.</b> Métodos de sintonía aplicados al proceso de flujo controlado .....	81
<b>Figura 88.</b> Flujo maestro y flujo controlado a diferentes razones de proporción: a) 0.25, b) 0.5, c) 0.75 y d) 1 .....	82
<b>Figura 89.</b> Resultados de la Pregunta 1 .....	83
<b>Figura 90.</b> Resultados de la Pregunta 2 .....	83
<b>Figura 91.</b> Resultados de la Pregunta 3 .....	84
<b>Figura 92.</b> Resultados de la Pregunta 4 .....	84
<b>Figura 93.</b> Resultados de la Pregunta 5 .....	84
<b>Figura 94.</b> Resultados de la Pregunta 6 .....	85
<b>Figura 95.</b> Resultados de la Pregunta 7 .....	85



## RESUMEN

En este trabajo de titulación se diseñó e implemento un sistema didáctico mediante la técnica de simulación hardware-in-the-loop (HIL), para desarrollar tareas de control avanzado y multivariable, el sistema se basa en una interacción de hardware y software es decir una parte física y otra simulada de procesos industriales. La parte de simulación consiste en la generación de la dinámica de los procesos en tiempo real, usando un computador a través de software Labview. La parte física del sistema está integrada por un controlador lógico programable (PLC) donde se desarrollan y sintonizan los algoritmos de control, tales como PID, cascada, adelanto y relación, la interacción entre las dos partes del sistema, es decir, las señales de realimentación y de control se logró mediante una DAQ. El sistema didáctico permitirá el desarrollo de prácticas donde los estudiantes implementen lazos de control multivariable, obteniendo una formación completa en controles avanzados.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CONTROL AVANZADO**
- **HARDWARE IN THE LOOP**
- **SIMULACIÓN INDUSTRIAL**
- **CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES**

## **ABSTRACT**

In this project was designed and implemented a didactic system using the technique of simulation hardware-in-the-loop (HIL), to develop advanced and multivariable control tasks, the system is based on a hardware and software interaction, that is, a part physical and another that simulates industrial processes. The simulation part consists in the generation of the dynamics of the processes in real time, using a computer through Labview software. The physical part of the system is integrated by a programmable logic controller (PLC) where the algorithms of control are developed and tuned, such as PID, cascade, feedforward and ratio control, the interaction of the electrical signals between the two parts of the system, that is, the feedback and control signals were obtained through a DAQ. The didactic system will allow the development of practices where students implement multivariable control loops, obtaining a complete training in advanced controls.

### **KEYWORDS:**

- **ADVANCED CONTROL**
- **HARDWARE IN THE LOOP**
- **INDUSTRIAL SIMULATION**
- **PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad la implementación de una estación de procesos que permita realizar controles avanzados y multivariable, tales como: control en cascada, control en adelanto y control en relación, tiene un alto costo económico, lo que provoca que no se pueda tener un número adecuado de estaciones de procesos con estas características para cada estudiante.

En el laboratorio de redes industriales y control de procesos no existe un gran número de estaciones que permitan realizar control multivariable, Es por ello que no se logra abarcar la gran cantidad de estudiantes que ahí realizan sus prácticas, a diferencia de esto se cuenta con una cantidad suficiente de controladores lógicos programables (PLC´s) que pueden ser utilizados.

El alto número de estudiantes al momento de realizar una práctica en el laboratorio, ocasiona que varios de ellos tengan que utilizar una misma estación de trabajo a la vez, es por esto que disminuye el grado de aprendizaje y manipulación de las estaciones de procesos y de los equipos que se maneja a la hora de realizar la práctica.

### 1.2 Antecedentes

Actualmente las prestaciones de los equipos tecnológicos utilizados en el campo del control de procesos industriales tienen una alta capacidad de procesamiento de información así como de su almacenamiento, lo cual permite obtener de forma real y confiable interfaces que interactúan con el usuario, y el comportamiento del proceso.

La simulación de procesos industriales tiene una gran importancia dentro del campo académico y el campo industrial, esto permite obtener una idea clara y real de cómo se comporta un determinado proceso aplicando los diferentes tipos de controles avanzados. Dependiendo del tipo de simulador, permite la conexión del controlador, lo cual muchas veces genera cierto tipo de restricciones a la hora de realizar un proyecto por la no compatibilidad con todos los controladores.

El campo de la industria cada vez más exigente y competitiva da la constante necesidad de automatizar sus procesos, por lo mencionado los estudiantes deben tener una formación completa en control automático. Resulta necesario desarrollar un ambiente de simulación práctico y sencillo para que los estudiantes refuercen de manera práctica las técnicas de control avanzado.

### **1.3 Justificación e Importancia**

La implementación del sistema bajo configuración HIL, para el desarrollo de controles avanzados permite al docente y al estudiante tener una herramienta práctica que beneficia a la hora de realizar sus prácticas dentro del laboratorio, ayudando a reducir el número de estudiantes que intervienen en una estación de procesos y así poder lograr realizar prácticas que anteriormente no pudieron ser efectuadas por falta de estaciones de procesos industriales.

El desarrollo del sistema didáctico HIL ayuda a que los estudiantes puedan aprovechar los PLC's disponibles en el laboratorio y así poder desarrollar las prácticas y obtener sólidos conocimientos prácticos que son de gran importancia para el desarrollo académico del estudiante y no solo teóricos, esto lleva a comprender de una mejor manera el funcionamiento de los controles avanzados y multivariable.

El sistema didáctico HIL permite realizar los diferentes tipos de controles avanzados tales como: control en cascada, control en adelanto y control en relación de manera individual en un computador con la ayuda del PLC, esto conlleva a que los

estudiantes manipulen los equipos resolviendo inquietudes y pueda comprender de mejor manera el comportamiento de los procesos industriales.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Diseñar e implementar un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Investigar acerca de los sistemas didácticos, estrategias de control avanzado para control automático de procesos y su aplicación mediante la técnica Hardware-in-the-Loop.
- Identificar los modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico del proceso nivel y caudal para propósito de control avanzado.
- Desarrollar un entorno de simulación HIL mediante una tarjeta de adquisición de datos e implementar las técnicas de controles simple, en adelante, cascada y relación.
- Validar el sistema de simulación desarrollado mediante comparaciones entre los resultados.

## **1.5 Variables de la investigación**

### **1.5.1 Variable Independiente**

Sistema didáctico para el control avanzado de procesos.

### **1.5.2 Variable Dependiente**

Desarrollo de prácticas sobre controles avanzados en procesos industriales para los estudiantes de ingeniería.

### **1.6 Hipótesis**

El diseño e implementación de un sistema didáctico de control avanzado permitirá el desarrollo de prácticas sobre control avanzado a los estudiantes de la carrera de ingeniería en Electrónica e Instrumentación, así como ayudara en el aprendizaje practico de los controles avanzados como son: control en cascada, control en adelanto y control de relación.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes Investigativos

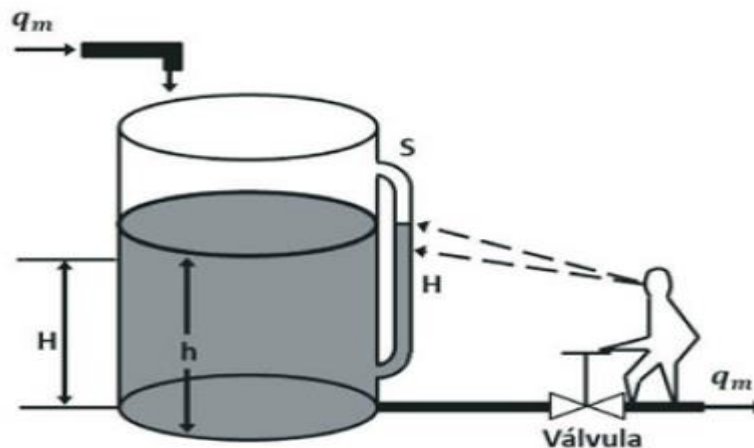
Actualmente en la industria y en los programas de enseñanzas la simulación de procesos ha tomado un rol importante para el aprendizaje de control y automatización de procesos industriales.

Entre algunas investigaciones que se han realizado tenemos: (Aghili & Piedboeuf, 2000), los cuales prueban en simulación el comportamiento de un robot especial, utilizando las ecuaciones diferenciales que describen su comportamiento, lo que permitió tener un diseño confiable del robot antes de probarlo en un entorno real. Además, (Zaev, Tuneski, & Babunski, 2012), mencionan que el uso de simulaciones HIL son importantes para el diseño de controladores y así comprobar su funcionamiento.

#### 2.2 Fundamentación Teórica

##### 2.2.1 Control de procesos

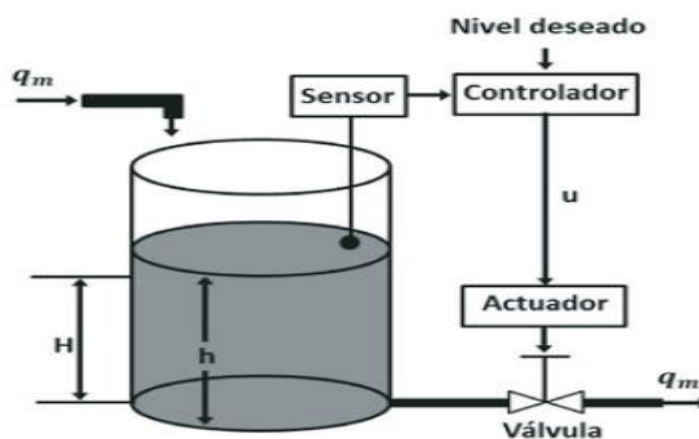
Esta es una rama del control automático enfocada, principalmente, en los sistemas de procesos químicos, farmacéuticos, petroquímicos y biotecnológicos. En la (Figura 1) se muestra un sistema de control de líquido en un tanque, se presenta un sistema controlado por el hombre. El sensor en este sistema es el ojo del humano y el actuador es la mano que gira el volante de una válvula de control colocada en la línea de descarga. A medida que el observador percibe que la columna de líquido dentro del tubo exterior asciende por encima del valor deseado, procede a girar la válvula para abrirla y hacer que se descargue parte del líquido que se encuentra almacenado dentro del tanque, con lo cual hace que el nivel de líquido dentro de este descienda hasta regresar al valor deseado.



**Figura 1.** Control de proceso asistido por un humano

Fuente: (Aldemar, 2014)

En la (Figura 2), se tiene un sistema de control de nivel automático, en el cual la medición del nivel de líquido es llevada a cabo por un sensor. Este sensor envía la señal de medición en forma continua a un controlador (el cual reemplaza a la mano del hombre) que envía una señal al actuador para que proceda a abrir la válvula para descargar el tanque, en el caso de que el nivel se encuentre por encima del valor deseado.



**Figura 2.** Control de proceso automático

Fuente: (Aldemar, 2014)

Es necesario hacer control en procesos industriales debido a que existen perturbaciones. Algunos propósitos de un sistema de control son ilustrar a los operadores



en las actividades que desempeñan a diario en la planta, mejorar la exactitud y la confiabilidad e incrementar la productividad y efectividad. (Aldemar, 2014)

### **2.2.2 Control Avanzado de procesos**

El control avanzado de procesos se puede definir como un conjunto de técnicas y herramientas que permiten adaptarse a las condiciones cambiantes del proceso.

Entre las técnicas para realizar control avanzado se pueden encontrar las siguientes:

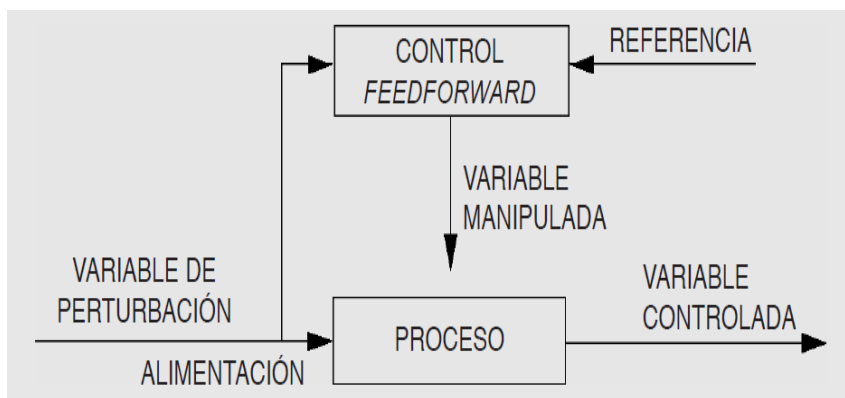
- Control feedforward.
- Control en cascada.
- Control de relación.

Es necesario hacer hincapié en que el objeto principal del control avanzado es producir estabilidad en la operación. Como consecuencia de la estabilidad se puede mejorar el objetivo económico al acercarse más a los límites restrictivos de las unidades de proceso, obteniendo:

- Mejora de rendimientos en productos de mayor valor añadido.
- Ahorro de energía.
- Incremento de la capacidad de producción. (Acedo, 2003)

- **Control feedforward**

Un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control feedforward, el cual compensa el efecto de las mismas antes que produzcan error en la variable controlada. Este sistema está limitado por la exactitud de las medidas, los cálculos efectuados y las perturbaciones no medidas, como indica la (Figura 3). (Acedo, 2003)

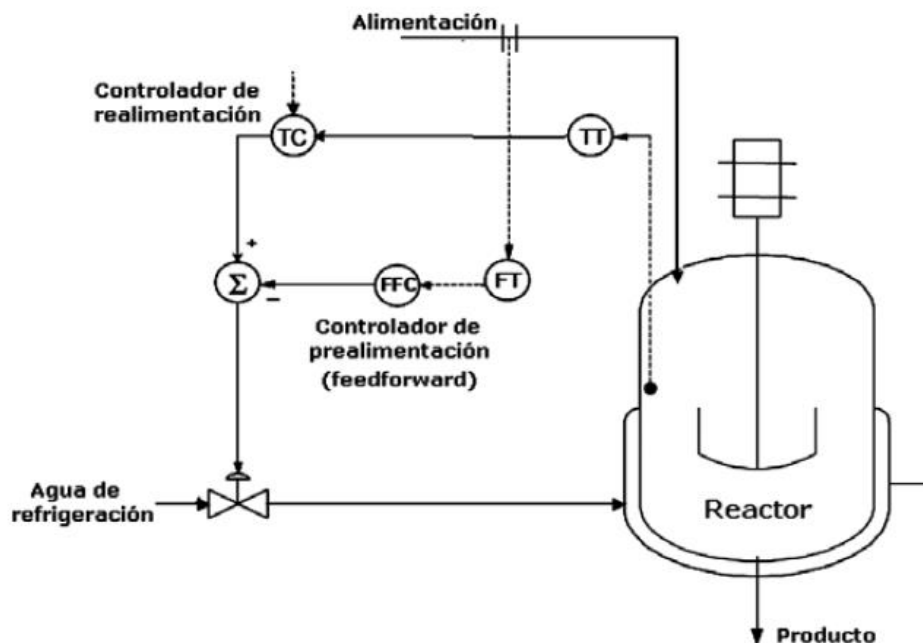


**Figura 3.** Diagrama de bloques de las variables que llegan al proceso

Fuente: (Acedo, 2003)

El control anticipativo (feedforward), denominado también control de prealimentación y control en adelante, al contrario que el control de realimentación, no espera a tener una señal de error para actuar sino que responde directamente a las perturbaciones en la variable o las variables de entrada sin permitir que su variación afecte a la variable controlada en la salida del proceso. Su aplicación es atractiva, y es teóricamente posible que compense totalmente las perturbaciones.

Pero para que este tipo de control actúe con eficacia es necesario disponer de un modelo del proceso suficientemente exacto, lo que requiere un conocimiento cuantitativo y exhaustivo del proceso; esto no es siempre posible, y más bien se tiende a una simplificación del modelo. De este modo, y sin considerar factores desconocidos (pérdidas, corrimiento de la calibración de los instrumentos, etc.), el control anticipativo actúa en lazo abierto, es decir, directamente sobre la válvula de control, pero sin tener en cuenta la variable controlada. Necesariamente se van a producir desviaciones en el valor de dicha variable. Para compensar éstas, se emplea como complemento un control en realimentación, como muestra la (Figura 4). (Creus, 2007)



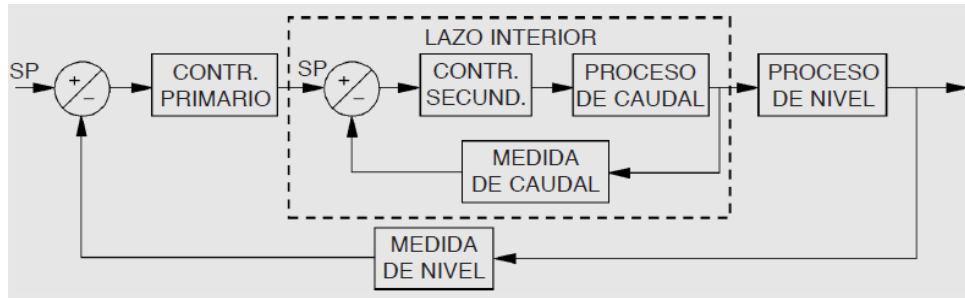
**Figura 4.** Control anticipativo

Fuente: (Creus, 2007)

- **Control en cascada**

Existen diferentes procesos con lazos simples de control en adelante entre los que se produce interacción. Para eliminarlas es necesario mediarla y controlarla por medio de un sistema de control denominado cascada.

Este sistema utiliza dos controladores en adelante, solamente uno de ellos denominado esclavo o secundario tiene salida de proceso, el controlador primario (Nivel) se utilizar la fijar el punto de consigna del secundario (Caudal). La variable a controlar es la medida del controlador primario, mientras que el secundario es una variable intermedia. En un sistema de control en cascada, la dinámica del lazo secundario debe ser siempre más rápida que la del primario, en caso contrario no es posible que funcione correctamente. (Acedo, 2003)

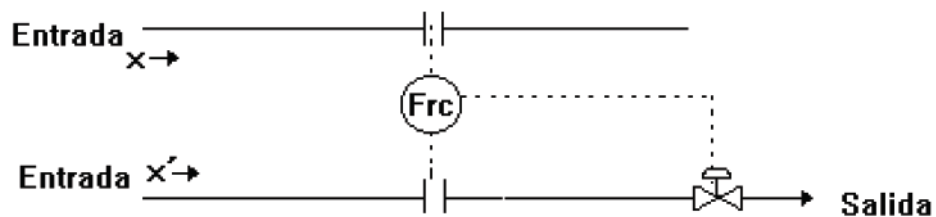


**Figura 5.** Diagrama de bloques de un control en cascada

Fuente: (Acedo, 2003)

- **Control de relación**

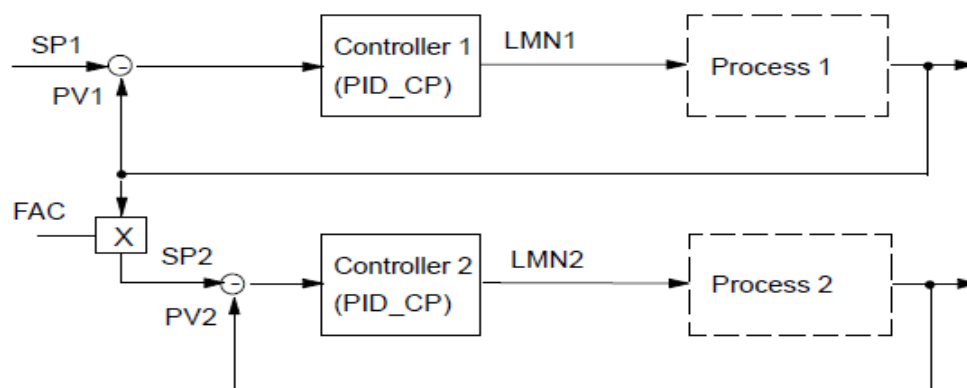
Lo que se hace aquí es medir los dos flujos, colocar un controlador de relación de flujo (FC), que también puede ser controlador-registrador de flujo. Aquí se tiene solo una variable de control, lo mismo que en control en cascada, y dos variables de medición; por esta razón, es un sistema de dos entradas y una salida, como muestra la (Figura 6). (Aldemar, 2014)



**Figura 6.** Control relacional

Fuente: (Aldemar, 2014)

La (Figura 7) proporciona un ejemplo simple de generar un control de relación para dos componentes, ya que a menudo se usa en procesos de combustión. La estructura se puede extender fácilmente para crear un controlador para más de dos variables de proceso con una relación constante.



**Figura 7.** Control en relación con dos bucles.

**Fuente:** (SIEMENS, 2003)

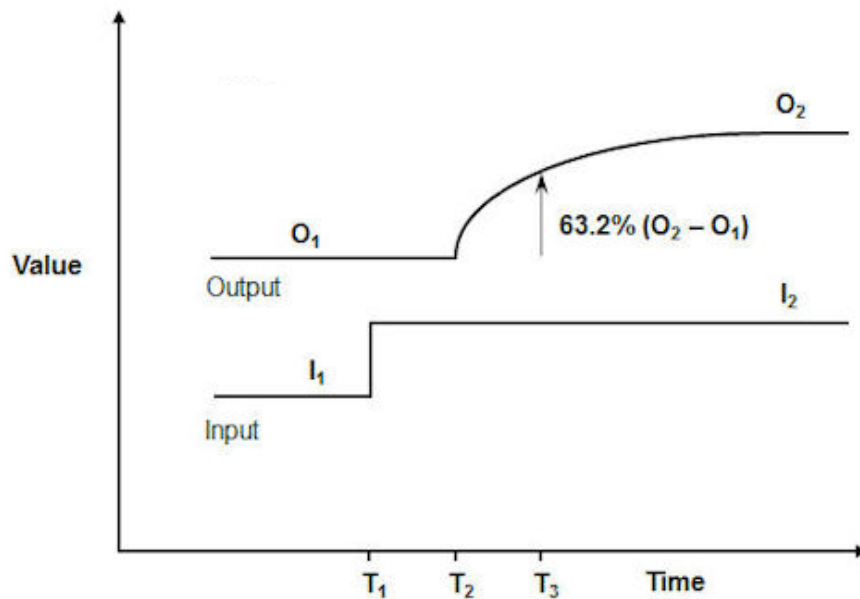
El controlador 1 actúa como el controlador primario para configurar el punto de ajuste para controlar la segunda variable de proceso. La relación entre PV1 y PV2 por lo tanto también permanece constante cuando la variable de proceso PV1 fluctúa debido a perturbaciones, como indica la (Figura 7). (SIEMENS, 2003)

### 2.2.3 Tipos de Procesos industriales

El tipo de proceso se define por sus características dinámicas, la caracterización del proceso es la identificación de la respuesta dinámica de un proceso a los cambios en sus entradas. Para calcular la característica dinámica de los procesos en lazo abierto, se modifica el valor del actuador (CV) y se mide la respuesta del proceso (PV), los procesos existentes en la industria pueden ser: autorregulados o Integrantes. (King, 2016)

- **Procesos autorregulados.**

El proceso autorregulado tiene una respuesta típica al cambio en su entrada como se muestra en la (Figura 8), donde la salida alcanza un nuevo punto de operación y permanece allí. Es decir, el proceso se regula a sí mismo a una nueva condición de funcionamiento. (Peacock, 2017)



**Figura 8.** Respuesta dinámica de un proceso autorregulado

Fuente: (Blevins, 2013)

Para un proceso de autorregulación, la respuesta del proceso se suele aproximar como una función de primer orden, es decir, la respuesta se caracteriza por tener ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto, como se ilustra en la siguiente ecuación. (Blevins, 2013)

$$G_m(s) = \frac{K_m * e^{-s\tau_m}}{1+sT_m} \quad (1)$$

Donde:

La ganancia  $K_m$  se obtiene a partir de:

$$K_m = \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1} \quad (2)$$

La constante de tiempo  $T_m$  se obtiene a partir de:

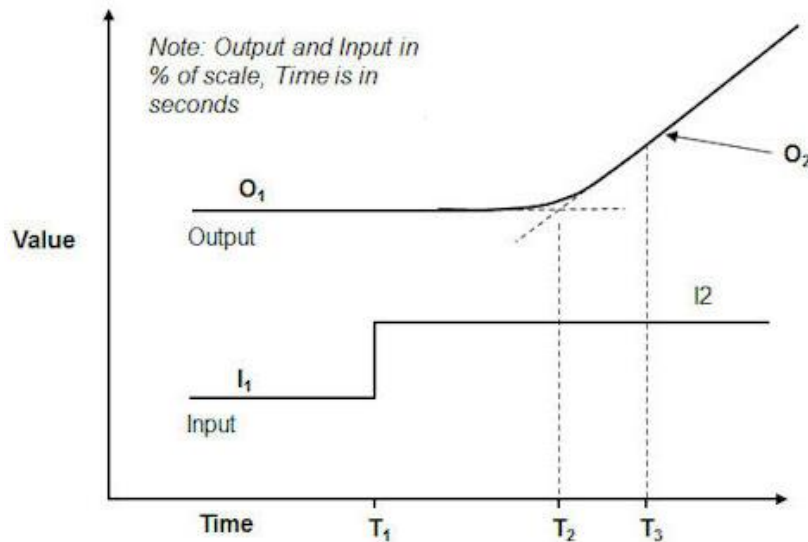
$$T_m = T_2 - T_1 \quad (3)$$

El tiempo muerto  $\tau_m$  se obtiene a partir de:

$$\tau_m = T_3 - T_2 \quad (4)$$

- **Procesos integrantes.**

Si se modifica la variable de control (CV) del controlador en lazo abierto, la variable de proceso (PV) comenzará a subir o bajar y seguirá moviéndose en esa dirección de una forma lineal en su mayoría, como se ilustra en la (Figura 9) se conoce como un proceso integrante. (Peacock, 2017)



**Figura 9.** Respuesta dinámica de un proceso integrante

Fuente: (Blevins, 2013)

En un proceso integrante, la respuesta se caracteriza por tener ganancia y tiempo muerto, como ejemplo tenemos el proceso de nivel de un tanque, como se ilustra en la siguiente ecuación. (Blevins, 2013)

$$G_m(s) = \frac{K_m * e^{-s\tau_m}}{s} \quad (5)$$

Donde:

La ganancia de integración  $K_m$  se obtiene a partir de:

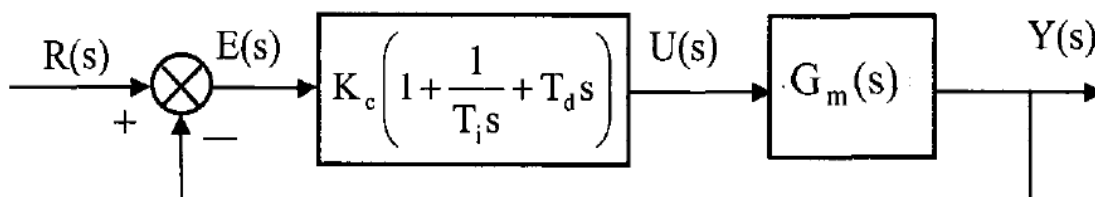
$$K_m = \frac{O_2 - O_1}{(I_2 - I_1) * (T_3 - T_2)} \quad (6)$$

El tiempo muerto  $\tau_m$  se obtiene a partir de:

$$\tau_m = T_2 - T_1 \quad (7)$$

## 2.2.4 Métodos de sintonización

La sintonización de los controladores Proporcional – Integral – Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado, como muestra el lazo de control de la (Figura 10). (researchgate, 2013)



**Figura 10.** Sistema de control realimentado

Fuente: (O'Dwyer, 2009)



## 2.2.5 Métodos de sintonización para procesos autorregulados.

- **Controlador PI**

Si se desea integrar un controlador Proporcional-Integral, la Tabla 1 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $K_c$ ) y el tiempo integral ( $T_i$ ) una vez que se haya identificado el proceso y este sea autorregulado:

**Tabla 1**

*Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso autorregulado*

Método	$K_c$	$T_i$
Chien	$\frac{0.7T_m}{K_m\tau_m}$	$2.33\tau_m$
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9T_m}{K_m\tau_m}$	$3.33\tau_m$
Callender	$\frac{0.568T_m}{K_m\tau_m}$	$3.64\tau_m$
Moros	$\frac{0.8T_m}{K_m\tau_m}$	$3\tau_m$
Reswick	$\frac{0.2}{K_m}$	$0.2\tau_m$
Fertik and Sharpe	$\frac{0.56}{K_m}$	$0.65T_m$

Fuente: (O'Dwyer, 2009)

- **Controlador PID**

Si se desea integrar un controlador PID, la Tabla 2 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $K_c$ ), el tiempo integral ( $T_i$ ) y el tiempo derivativo ( $T_d$ ) para un modelo de proceso autorregulado:

**Tabla 2** *Métodos de sintonía para un controlador PID en un proceso autorregulado*

<b>Método</b>	$K_c$	$T_i$	$T_d$
Chien	$\frac{0.95T_m}{K_m\tau_m}$	$2.38\tau_m$	$0.42\tau_m$
Ziegler and Nichols	$\frac{aT_m}{K_m\tau_m}$ $a \in [1.2,2]$	$2\tau_m$	$0.5\tau_m$
Callender	$\frac{1.066}{K_m\tau_m}$	$1.418\tau_m$	$0.353\tau_m$
Parr	$\frac{1.25T_m}{K_m\tau_m}$	$2.5\tau_m$	$0.4\tau_m$
Borresen and Grindal	$\frac{T_m}{K_m\tau_m}$	$3\tau_m$	$0.5\tau_m$
Moros	$\frac{1.2T_m}{K_m\tau_m}$	$2\tau_m$	$0.42\tau_m$
Lipták	$\frac{0.85T_m}{K_m\tau_m}$	$1.6\tau_m$	$0.6\tau_m$

Fuente: (O'Dwyer, 2009)

### 2.2.6 Métodos de sintonización para procesos integrantes.

- **Controlador PI**

Si se desea integrar un controlador Proporcional-Integral, la Tabla 3 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $K_c$ ) y el tiempo integral ( $T_i$ ) una vez que se haya identificado el proceso y este sea integrante.

**Tabla 3***Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso integrante*

<b>Método</b>	$K_c$	$T_i$
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9}{K_m\tau_m}$	$3.33\tau_m$

CONTINÚA 

Coon	$\frac{1.0}{K_m \tau_m}$	0
Aström and Hägglund	$\frac{0.63}{K_m \tau_m}$	$3.2\tau_m$
Hay	$\frac{0.42}{K_m \tau_m}$	$5.8\tau_m$
Skogestad	$\frac{0.404}{K_m \tau_m}$	$7\tau_m$

Fuente: (O'Dwyer, 2009)

- **Controlador PID**

Si se desea integrar un controlador PID en un modelo de proceso integrante, la Tabla 4 muestra diferentes métodos de sintonía para calcular la ganancia proporcional ( $K_c$ ), el tiempo integral ( $T_i$ ) y el tiempo derivativo ( $T_d$ ).

**Tabla 4**

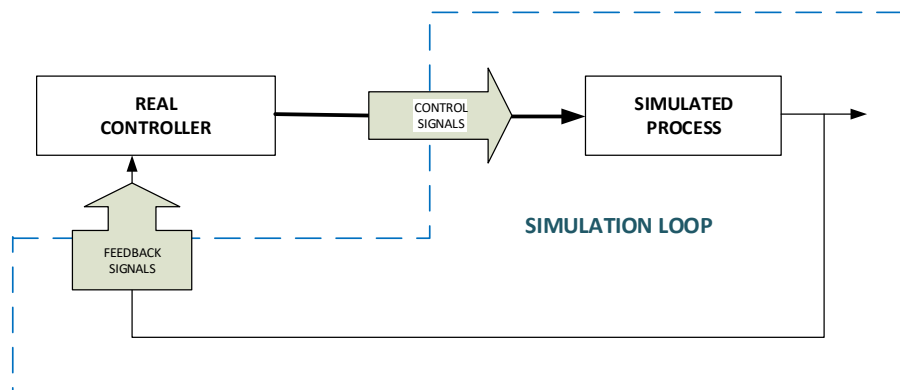
*Métodos de sintonía para un controlador PI en un proceso integrante*

Método	$K_c$	$T_i$	$T_d$
Ford	$\frac{1.48}{K_m \tau_m}$	$2\tau_m$	$0.37\tau_m$
Hay	$\frac{0.4}{K_m \tau_m}$	$3.2\tau_m$	$0.8\tau_m$
Aström and Hägglund	$\frac{0.94}{K_m \tau_m}$	$2\tau_m$	$0.5\tau_m$
Leonard	$\frac{0.74}{K_m \tau_m}$	$12.2\tau_m$	$0.41\tau_m$
Rotach	$\frac{1.21}{K_m \tau_m}$	$1.60\tau_m$	$0.48\tau_m$
Zou and Brigham	$\frac{2}{K_m(\lambda + 0.5\tau_m)}$ $0.5\tau_m \leq \lambda \leq 3\tau_m$	$2\lambda + \tau_m$	$\frac{\lambda + 0.25\tau_m}{2\lambda + \tau_m} \tau_m$

Fuente: (O'Dwyer, 2009)

## 2.2.7 Hardware-in-the-Loop

En los sistemas de simulación Hardware-in-the-Loop, parte del bucle de simulación está compuesto por software de computadora o un sistema embebido, mientras que el resto son los sistemas de hardware reales. Su técnica consiste en combinar un modelo; es decir, la versión virtual de una parte del sistema con una parte real del sistema, que por lo tanto solo se simula parcialmente. La simulación tiene como objetivo la generación del entorno de la planta (generación de señales de proceso, lectura de señales de control), como muestra la (Figura 11). (Cantot & Luzeaux, 2016)



**Figura 11.** Sistema de simulación Hardware-in-the-Loop

Fuente: (Halvorsen, 2012)

- **Aplicaciones**

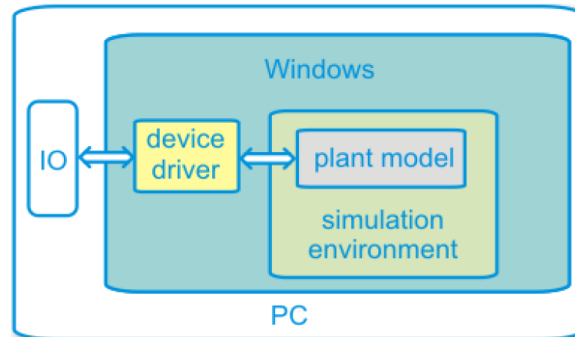
La simulación HIL es ampliamente utilizada en el desarrollo de Sistemas de Control, tales como:

- Dispositivos médicos
- Maquinas industriales
- Generación de Sistemas energía
- Electrodomésticos
- Aeroespacial
- Automotriz
- Control de procesos. (Halvorsen, 2012)

## 2.2.8 Paradigmas de simulación HIL

- **Simulación HIL basado en PC**

El simulador HIL se desarrolla generalmente en una computadora con sistema operativo Windows. En esta PC se desarrolla un entorno de simulación, que se utiliza para ejecutar el modelo de la planta. La conexión con el sistema de control es proporcionada por un dispositivo de I/O que está conectado con el controlador. El entorno de simulación proporciona la comunicación adecuada entre el modelo de planta y la interfaz I/O, como muestra la (Figura 12). (Controllab, 2015)

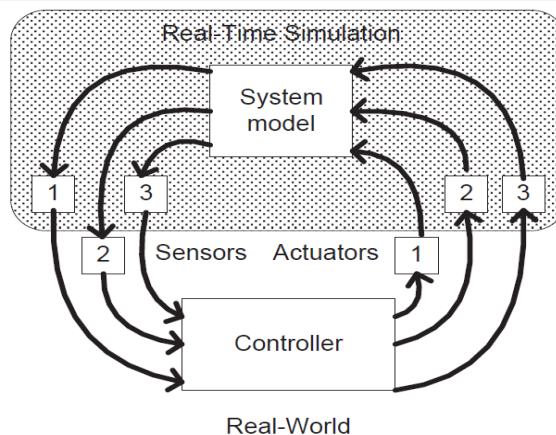


**Figura 12.** Componentes de un simulador HIL basado en PC

Fuente: (Controllab, 2015)

- **Simulación HIL basado en sistema embebido**

Al utilizar este entorno de simulación embebido como es el caso de sistemas basado en FPGA, se puede probar fácilmente de una manera práctica, barata y no peligrosa el modelo de la planta en un solo chip para utilizarlo en aplicaciones de simulación en tiempo real, como muestra la (Figura 13). (DUMAN, CAN, & AKIN, 2014)



**Figura 13.** Simulador HIL Basado en un sistema embebido

Fuente: (DUMAN, CAN, & AKIN, 2014)

## 2.2.9 PLC

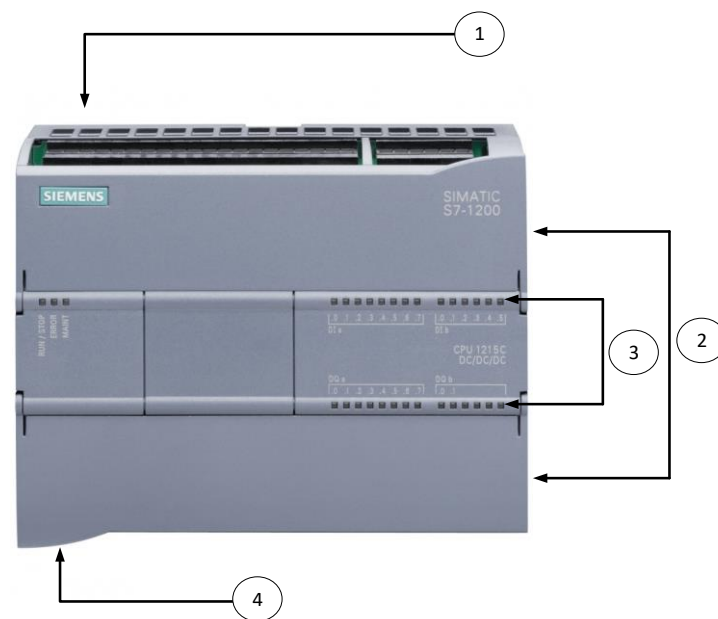
Los Controladores Lógicos Programables o PLC (Programmable Logic Control) son autómatas que poseen una unidad central de proceso, que es el corazón del PLC y que recibe datos de dispositivos conectados a las entradas de dicho PLC (transmisores), procesa dichos datos en función del programa contenido en la CPU y arroja los resultados a las salidas del PLC, donde hay actuadores (relés, triacs, sistemas de arranque, etc.). (Club Saber Electrónica, 2012)

### 2.2.10 PLC S7 1200

El controlador S7-1200 (Figura 14) ofrece la flexibilidad y potencia necesarias para controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas necesidades de automatización. Gracias a su diseño compacto, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, el S7-1200 es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones. (SIEMENS, 2015)

La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, PROFINET integrado, E/S de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas, todo ello en una carcasa compacta,

conformando así un potente controlador. Una vez cargado el programa en la CPU, esta contiene la lógica necesaria para vigilar y controlar los dispositivos de la aplicación. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de contaje y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes. (SIEMENS, 2015)



**Figura 14.** PLC S7-1200

Fuente: (SIEMENS, 2015)

Las partes del PLC se describen en la (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Partes del PLC S7-1200*

Parte	Descripción
1	Conector de corriente
2	Ranura para Memory Card
3	LED's de estado de entradas y salidas.
4	Conector PROFINET

Fuente: (SIEMENS, 2015)

- **Ejecución del programa de usuario**

La ejecución del programa de usuario comienza con uno o varios bloques de organización (OB) de arranque que se ejecutan una vez al cambiar a estado operativo RUN, seguidos de uno o varios OB de ciclo que se ejecutan cíclicamente. También puede asociar un OB con un evento de alarma, que puede ser un evento estándar o un evento de error. Estos OB se ejecutan cuando se produce el evento estándar o de error correspondiente.

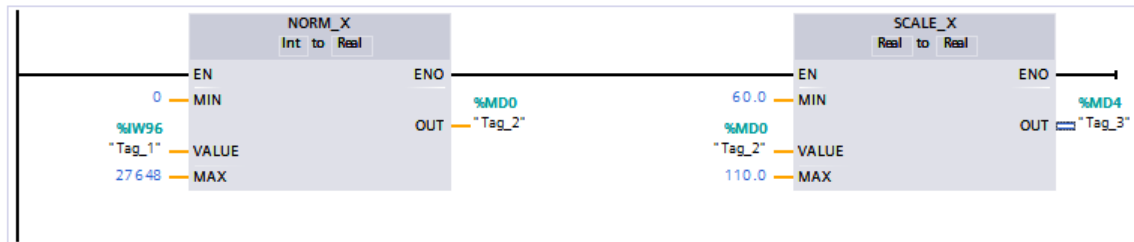
- **Procesamiento de valores analógicos**

Los módulos de señales analógicas proporcionan señales de entrada o esperan valores de salida que representen un rango de tensión o de corriente. Estos rangos son  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 2,5$  V o 0 - 20 mA. Los valores que devuelven los módulos son valores enteros en los que 0 a 27648 representa el rango nominal de corriente, y -27648 a 27648 de tensión. Cualquier valor fuera del rango representa un rebase por exceso o por defecto.

En el programa de control puede ser necesario utilizar estos valores en unidades de ingeniería, por ejemplo, para representar un volumen, temperatura, peso o cualquier otro valor cuantitativo. En el caso de una entrada analógica, para hacerlo primero hay que normalizar el valor analógico a un valor real (coma flotante) de 0,0 a 1,0. A continuación hay que escalarlo a los valores mínimo y máximo de las unidades de ingeniería que representa.

En el caso de valores de unidades de ingeniería que deben convertirse a valores de salida analógicos, primero hay que normalizar el valor en las unidades de ingeniería a un valor entre 0,0 y 1,0, y a continuación escalarlo entre 0 y 27648 o -27648 a 27648, dependiendo del rango del módulo analógico, como indica la (Figura 15). (SIEMENS, 2015)





**Figura 15.** Programación en el bloque principal del TIA PORTAL

Fuente: (SIEMENS, 2015)

- **Control PID**

STEP 7 ofrece las siguientes instrucciones PID para la CPU S7-1200:

- La instrucción PID\_Compact se utiliza para controlar procesos técnicos con variables continuas de entrada y salida.
- La instrucción PID\_3Step se utiliza para controlar dispositivos accionados por motor, como válvulas que requieren señales discretas para las acciones de apertura y cierre.
- La instrucción PID\_Temp ofrece un regulador PID universal que permite manejar los requisitos específicos de control de temperatura.

Las tres instrucciones PID (PID\_Compact, PID\_3Step y PID\_Temp) pueden calcular las acciones P, I y D durante el arranque (si se han configurado para "optimización inicial"). También es posible configurar la instrucción para la "optimización fina" con el fin de optimizar los parámetros. No es necesario especificar los parámetros manualmente. (SIEMENS, 2015)

- **Algoritmo PID**

El regulador PID (Proporcional/Integral/Derivativo) mide el intervalo de tiempo entre dos llamadas y evalúa el resultado para controlar el tiempo de muestreo. En cada cambio de modo y en el primer arranque se genera un valor medio del tiempo de muestreo. Dicho valor se utiliza como referencia para la función de vigilancia y para realizar cálculos. La vigilancia incluye el tiempo de medición actual entre dos llamadas y

el valor medio del tiempo de muestreo definido del regulador. El valor de salida del regulador PID está formado por tres acciones: (SIEMENS, 2015)

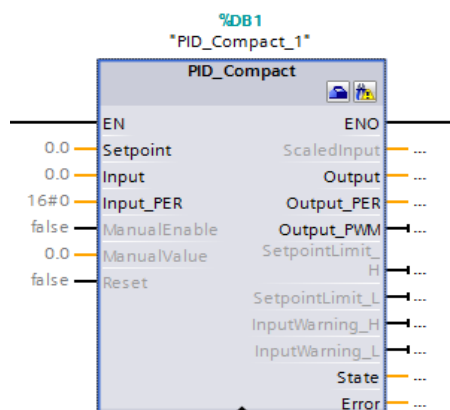
P (proporcional): cuando se calcula con la acción "P", el valor de salida es proporcional a la diferencia entre la consigna y el valor de proceso (valor de entrada).

I (integral): cuando se calcula con la acción "I", el valor de salida aumenta en proporción a la duración de la diferencia entre la consigna y el valor de proceso (valor de entrada) para corregir la diferencia al final.

D (derivativo): cuando se calcula con la acción "D", el valor de salida aumenta como una función de la tasa de incremento de cambio de la diferencia entre la consigna y el valor de proceso (valor de entrada). El valor de salida se corrige a la consigna lo más rápido posible. (SIEMENS, 2003)

- **Instrucción PID\_Compact**

La instrucción PID\_Compact ofrece un regulador PID universal con autoajuste integrado para modo automático y manual. El bloque PID\_compact se muestra en la (Figura 16). (SIEMENS, 2015)



**Figura 16.** Bloque PID\_Compact

Fuente: (SIEMENS, 2015)

## 2.2.11 LabVIEW

LabVIEW es una herramienta de programación G o gráfica (Figura 17). Principalmente, se usa en campos de prueba y automatización para control de instrumentos, adquisición de datos, etc. (Lajara, 2007)



**Figura 17.** Software LabVIEW

Fuente: (National Instruments, 2018)

Los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI, que significa instrumento virtual (Virtual Instruments). En LabVIEW un VI, está formado por estos dos componentes:

Los VIs son jerárquicos y modulares. Pueden utilizarse como programas de alto nivel o como subprogramas de otros programas, cuando un VI se usa dentro de otro VI, se denomina subVI. (Lajara, 2007)

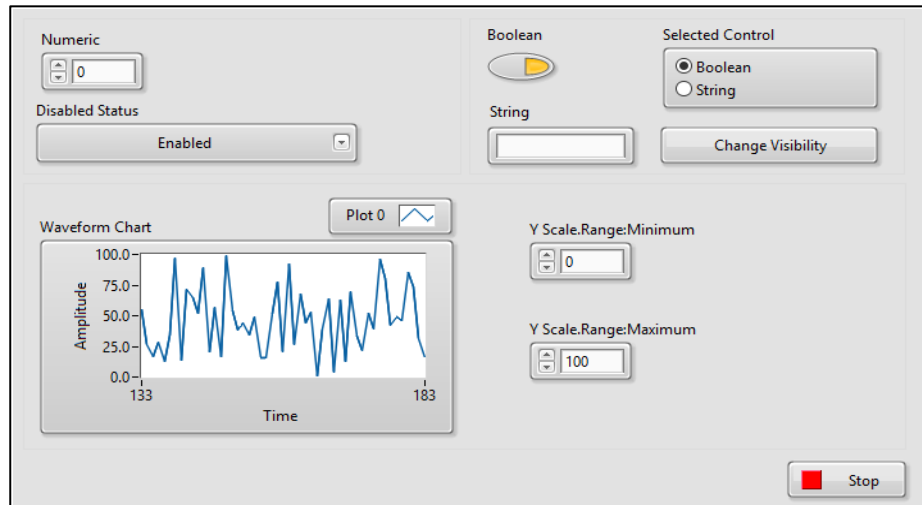
- **Panel frontal**

Es la interfaz con la que interactúa el usuario cuando el programa se está ejecutando. Se compone básicamente de dos tipos de elementos:

- Controles: son las entradas al VI.

- Indicadores: son las salidas del VI.

La (Figura 18) muestra el ejemplo de un panel frontal con controles que modifican el valor de una variable e indicadores que muestran resultados.



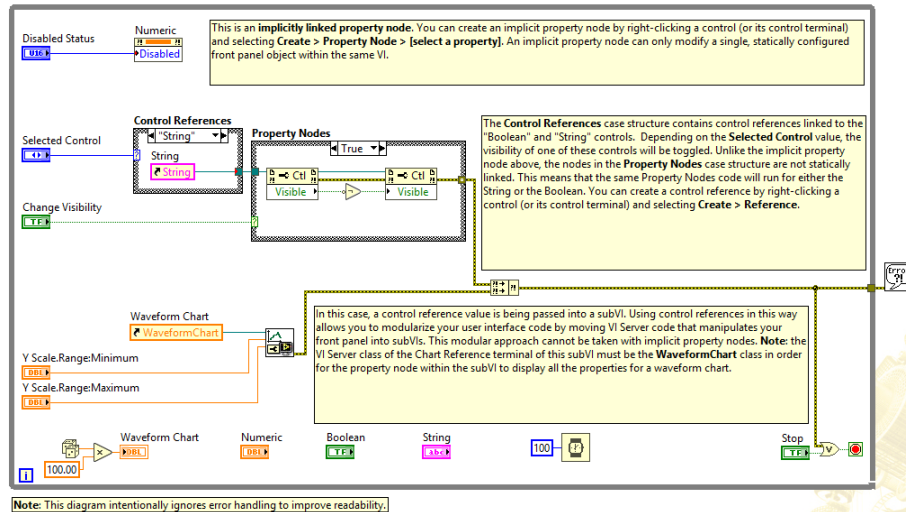
**Figura 18.** Ejemplo de panel frontal de LabVIEW

Fuente: (National Instruments, 2018)

- **Diagrama de bloques:**

Es el programa donde el programador define la funcionalidad mediante las interconexiones de bloques (Figura 19).

- Implementa las estructuras y funciones que se ejecutarán.
- Los datos se propagan a través de conectores, desde los controles pasan a través de funciones y terminan en los indicadores, que indican el resultado de la ejecución.
- Los bloques se ejecutan a través del flujo de datos.

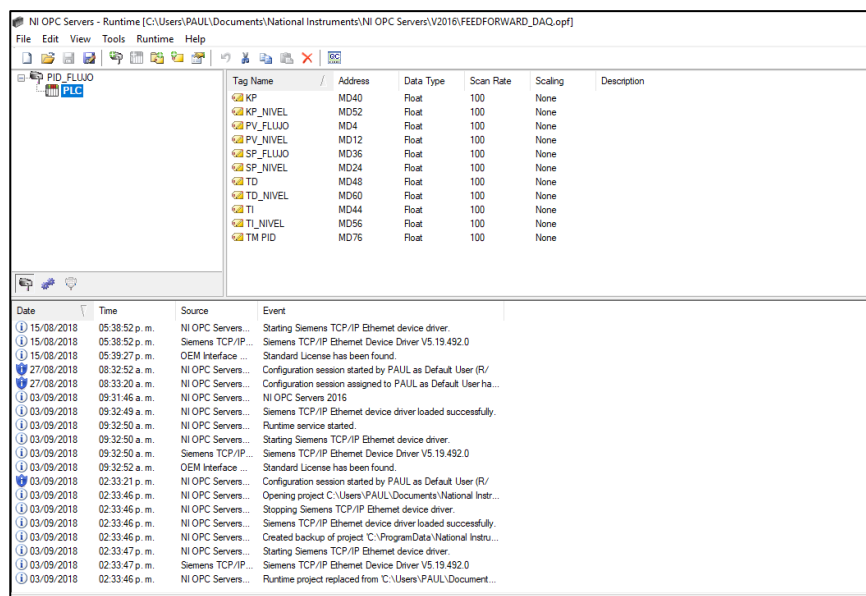


**Figura 19.** Ejemplo de diagrama de bloques

Fuente: (National Instruments, 2018)

- **OPC**

El software NI LabVIEW se puede comunicar con cualquier controlador lógico programable (PLC) en una variedad de formas. OLE para Control de proceso (OPC) define el estándar para comunicar datos de planta en tiempo real entre dispositivos de control e interfaces de máquina humana (HMI). Los servidores OPC están disponibles para prácticamente todos los PLC y controladores de automatización programables (PAC). En este tutorial, aprenda cómo usar LabVIEW para comunicarse con un PLC en red usando OPC. La (Figura 20) muestra el software NI OPC Server. (National Instruments, 2012)



**Figura 20.** Software NI OPC Server

Fuente: (National Instruments, 2012)

### 2.2.12 DAQ

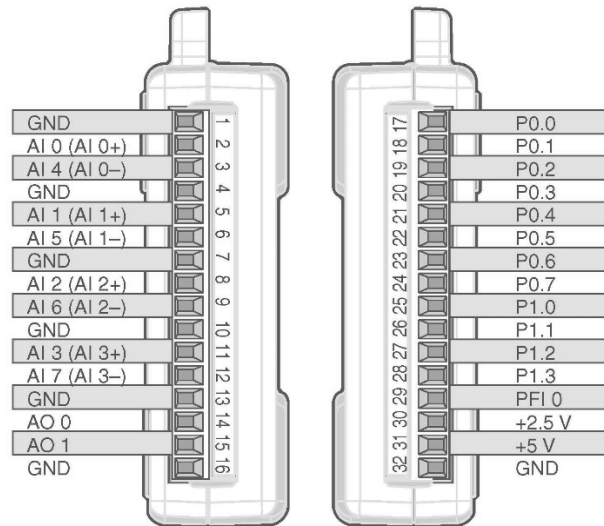
Las tarjetas DAQ (Data Acquisition) no operan de forma independiente, sino que necesitan un ordenador para gobernarlas, es decir actúa como la interfaz entre una computadora y señales físicas, como si se tratara de un intérprete que traduce de un lenguaje a otro, con el fin de que el sistema digital sea capaz de comprender señales analógicas y viceversa. Las capacidades comunes que suelen tener las DAQ son:

- Adquisición de señales analógicas.
- Generación de señales analógicas.
- Generación y adquisición de señales digitales.
- Contadores y timers. (Lajara, 2007)

### 2.2.13 NI DAQ 6008

La tarjeta NI DAQ 6008 de National Instruments, cuenta con doce terminales de señales digitales (5 VDC) que se pueden programar como entrada o como salida e internamente tienen lógica transistor-transistor (TTL), también cuenta con una entrada de

conteo rápido. Tiene ocho entradas análogas (0-10 VDC) y salidas análogas (0-5 VDC), las variables de esta tarjeta se programan a través del software LabVIEW. Los periféricos de entrada y salida de la NI DAQ 6008 se muestran en la (Figura 13). (National Instruments, 2016)



**Figura 21.** Terminales de entrada y salida de la NI DAQ 6008

Fuente: (National Instruments, 2016)

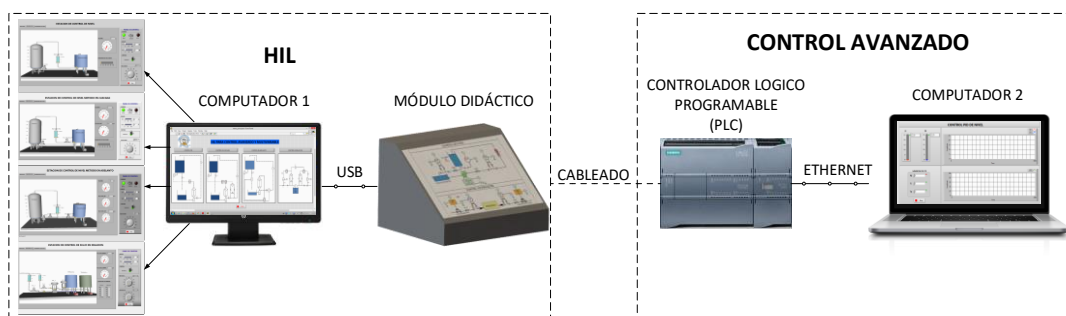
## CAPÍTULO III

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo, se describe de manera detallada el diseño e implementación del sistema didáctico, específicamente la creación del HMI del simulador y las técnicas de control avanzado.

Para dicha constitución se obtuvieron los modelos matemáticos del proceso integrante nivel y autorregulado caudal, los modelos obtenidos son transferidos al software LabVIEW donde se simula el comportamiento del proceso en tiempo real y la interacción con el mundo real mediante una tarjeta de adquisición de datos, además se presentará los diferentes lazos de control aplicados a las simulaciones de los procesos.

Es importante conocer tanto los componentes del hardware como el software para su correcto uso para ello se describe en la (Figura 22) los elementos que conforman el sistema.



**Figura 22.** Sistema implementado

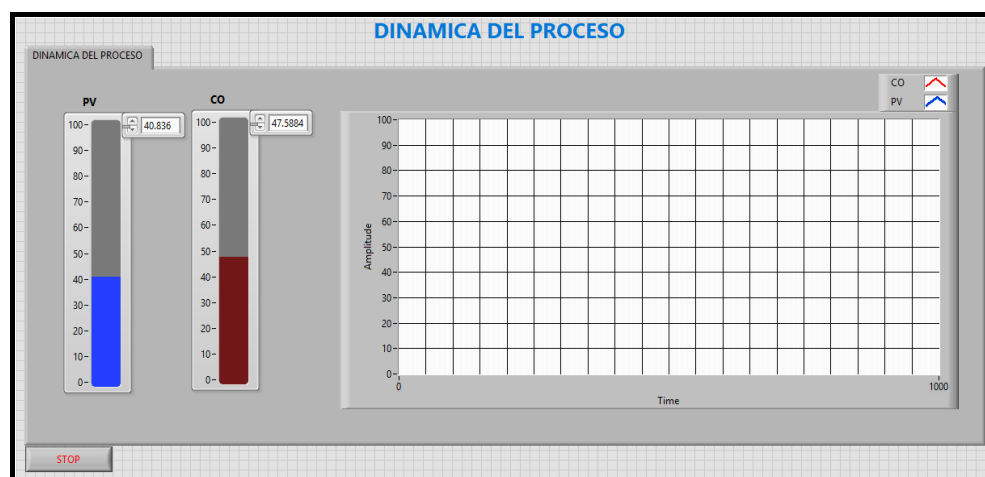
#### 3.1 Identificación de la dinámica del proceso nivel y caudal

Para desarrollar la parte de la simulación de las estaciones de procesos industriales en el sistema didáctico es necesario conocer la respuesta de las estaciones



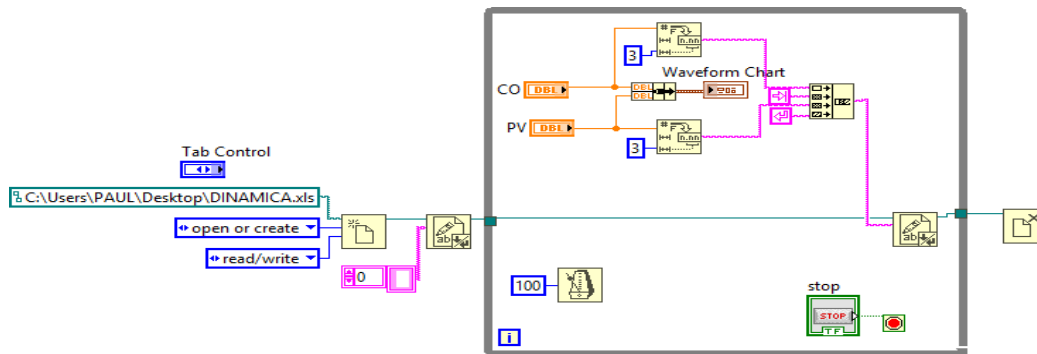
físicas de nivel modelo 3503-MO y la estación física de caudal modelo 3502-MO ambas conectadas por tuberías, ante una entrada escalón y representarla a través de una función de transferencia, es decir obtener la dinámica del proceso.

Para lograr obtener una respuesta se programa al PLC S7 1200 para enviar señales al actuador y leer las medidas de los transmisores de nivel y flujo, para ello se implementa una interfaz de usuario con el fin de observar y registrar la dinámica del proceso como el de la (Figura 23), donde la conexión entre LabVIEW y el PLC se lo realiza a través del software NI OPC Server.



**Figura 23.** HMI para obtener la dinámica del proceso

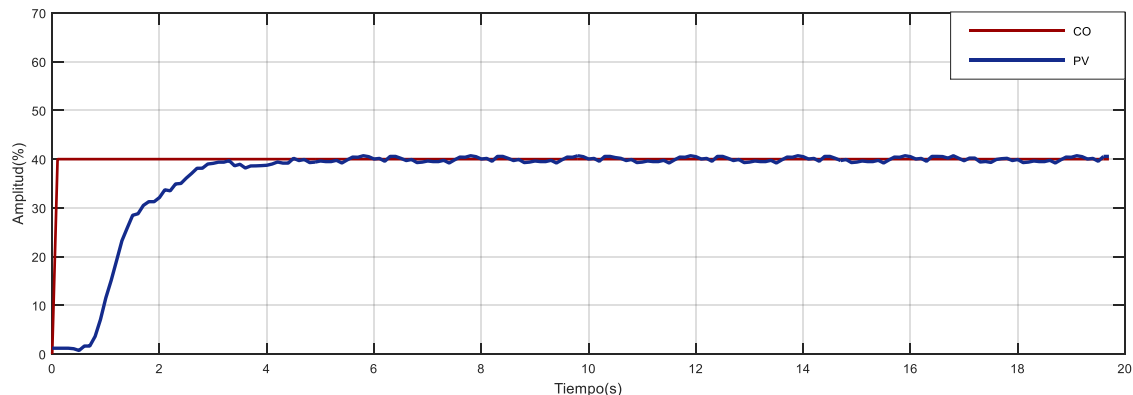
En la (Figura 24) se muestra el diagrama de bloques para obtener la dinámica del proceso, para ello se enlaza las variables de control CO y el indicador PV al servidor OPC que tiene conexión directa a las variables del PLC, donde los datos adquiridos, son graficados y registrados en un archivo de tabla a una tasa de muestreo de 100ms, que será un tiempo fundamental para su posterior simulación.



**Figura 24.** Diagrama a bloques para obtención de la dinámica de los procesos

### 3.1.1 Proceso autorregulado caudal

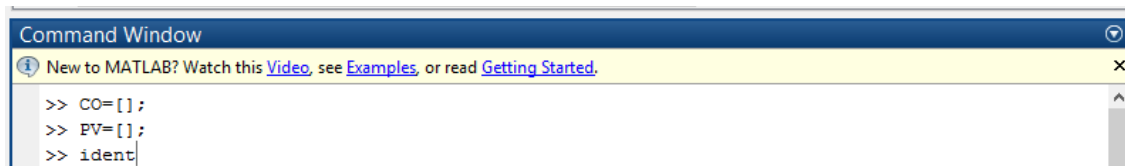
Para obtener la dinámica del proceso caudal, se modifica la variable de control (CO) del controlador en lazo abierto, y se registra la variable de proceso (PV), obteniendo una respuesta como se ilustra en la (Figura 25).



**Figura 25.** Dinámica del proceso caudal

A continuación, se describe el procedimiento para obtener el modelo matemático de la variable flujo haciendo uso del software Matlab.

En la ventana de comandos de Matlab creamos vectores que serán de ayuda para ingresar y cargar tanto los datos de entrada (CO) como los de salida (PV), después de eso llamamos a la función "ident", como muestra la (Figura 22).



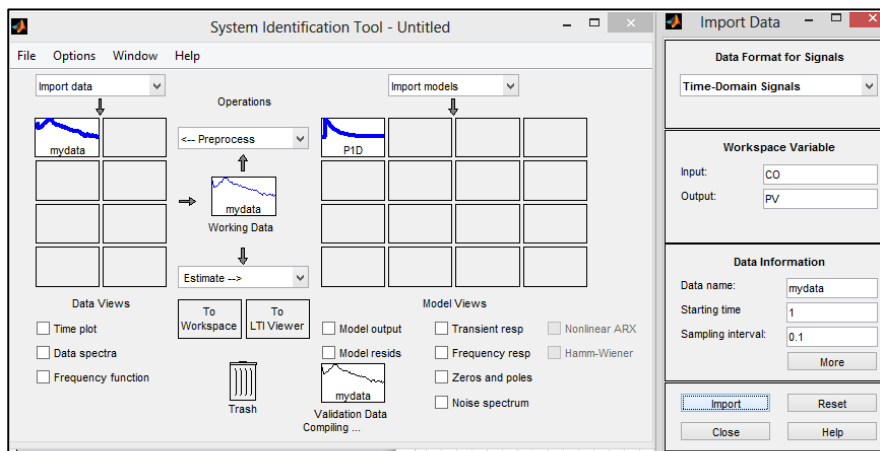
```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> CO=[];
>> PV=[];
>> ident

```

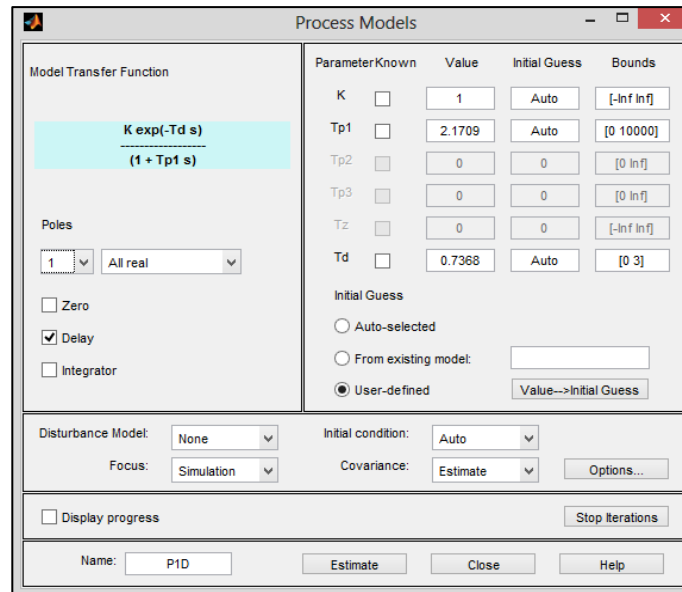
**Figura 26.** Creación de vectores

Se despliega la siguiente pantalla (Figura 27) en donde colocaremos el vector de entrada “CO” y el vector de salida “PV”, con los datos recolectados, además incluiremos el intervalo de muestreo que estemos usando, y presionamos el botón “import”.



**Figura 27.** Ventana de importación de datos

Seleccionamos el modelo de la función de transferencia con la que vamos a estimar el proceso y al presionar el botón “Estimate” obtendremos los siguientes valores que se muestran en la (Figura 28).



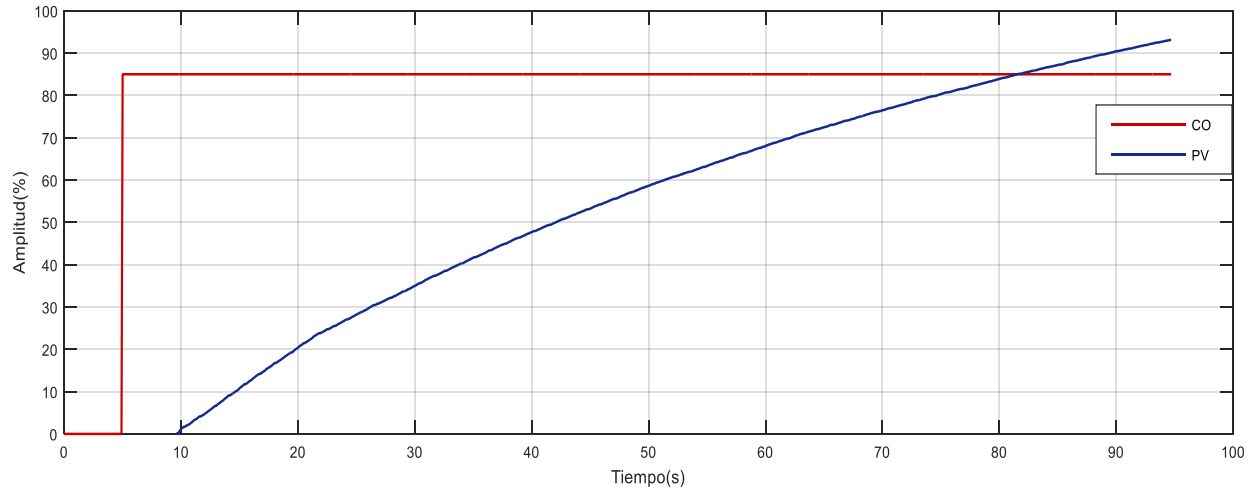
**Figura 28.** Ventana de identificación del modelo

Entonces se obtiene el modelo matemático que representa las características dinámicas del proceso flujo, que será usado para la simulación de los procesos industriales:

$$G(s) = \frac{1}{2.1709s+1} * e^{-0.7368s} \quad (8)$$

### 3.1.2 Proceso integrante nivel

Para obtener la dinámica del proceso nivel, se modifica la variable de control (CO) del controlador en lazo abierto, y se registra el ascenso de la variable de proceso (PV), verificando que el proceso nivel presenta un comportamiento integrante, obteniendo la respuesta que se ilustra en la (Figura 29).



**Figura 29.** Dinámica del proceso nivel

Los datos obtenidos de la gráfica son reemplazados en las fórmulas que se mencionó en el capítulo anterior para la obtención de la dinámica en procesos integrantes, por lo tanto, el modelo matemático únicamente del proceso nivel será:

$$G(s) = \frac{0.01408}{s} * e^{-4.1s} \quad (9)$$

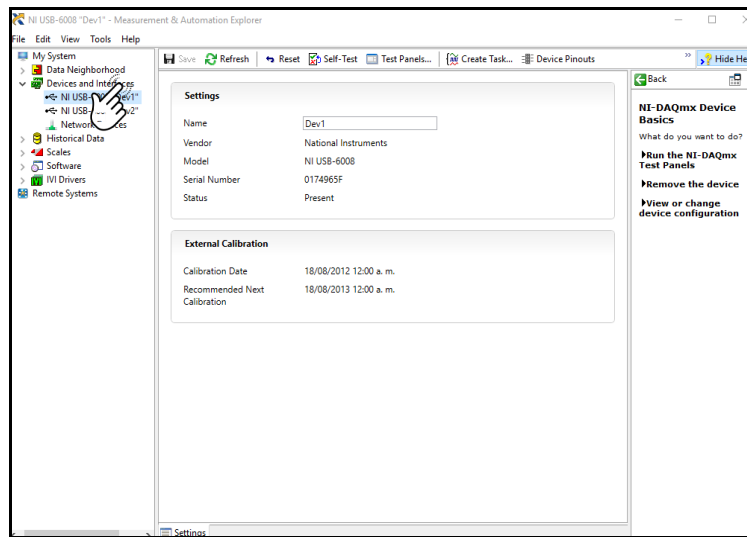
Para la implementación de los controladores en cascada y adelanto es necesario conocer cuál es la respuesta de la variable nivel cuando el flujo en la tubería de entrada se encuentra correctamente sintonizado, por lo tanto, el modelo matemático del proceso con las condiciones anteriormente mencionadas ahora será:

$$G(s) = \frac{0.0129}{s} * e^{-4.7s} \quad (10)$$

### 3.2 Configuración del dispositivo NI DAQ 6008

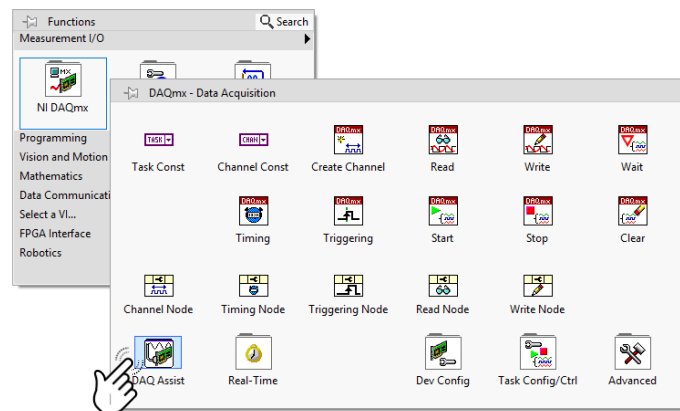
Para empezar a generar y adquirir señales con el dispositivo NI-DAQ 6008 y manipularlo desde el computador es necesario instalar el paquete NI-DAQmx para la versión de LabVIEW existente. Una vez que la tarjeta haya sido conectada a la computadora será necesario acceder al menú de Windows y buscar dentro de los

programas de National Instruments, el software NI-MAX, al ejecutar el software y acceder a la pestaña “Devices and Interface” se indica el estado del dispositivo y sus características, como muestra la (Figura 30). En caso de indicar error es necesario revisar la conexión y reinstalar el controlador de la tarjeta.



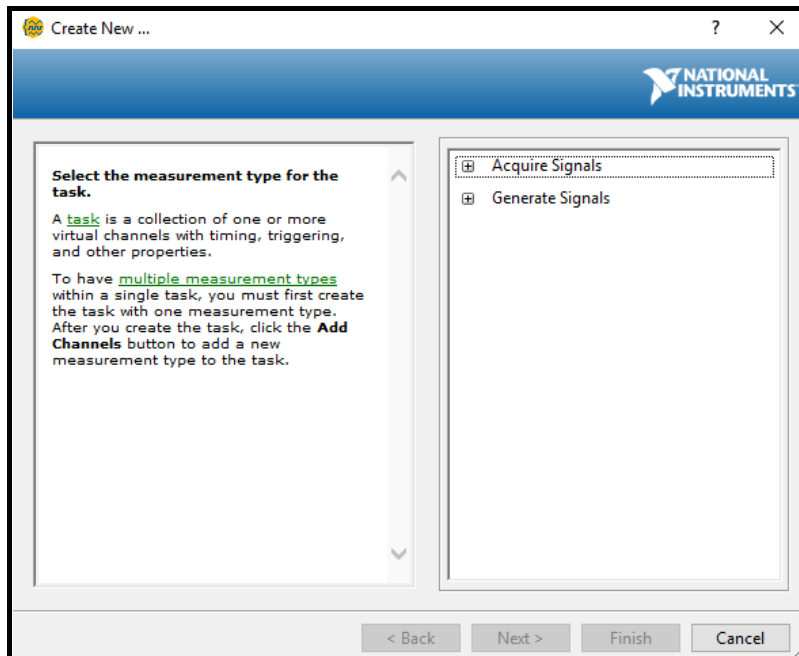
**Figura 30.** Ventana de NI-MAX

Para la programación de la tarjeta en el software LabVIEW. En el diagrama de bloques se dispone de un asistente que permiten configurar, adquirir y enviar datos a la NI-DAQ 6008. Para acceder al asistente de configuración se selecciona “Measurement I/O” luego “NI-DAQmx” y “DAQ Assistant”, como indica la (Figura 31).



**Figura 31.** Acceso al DAQ Assistant desde el diagrama de bloques

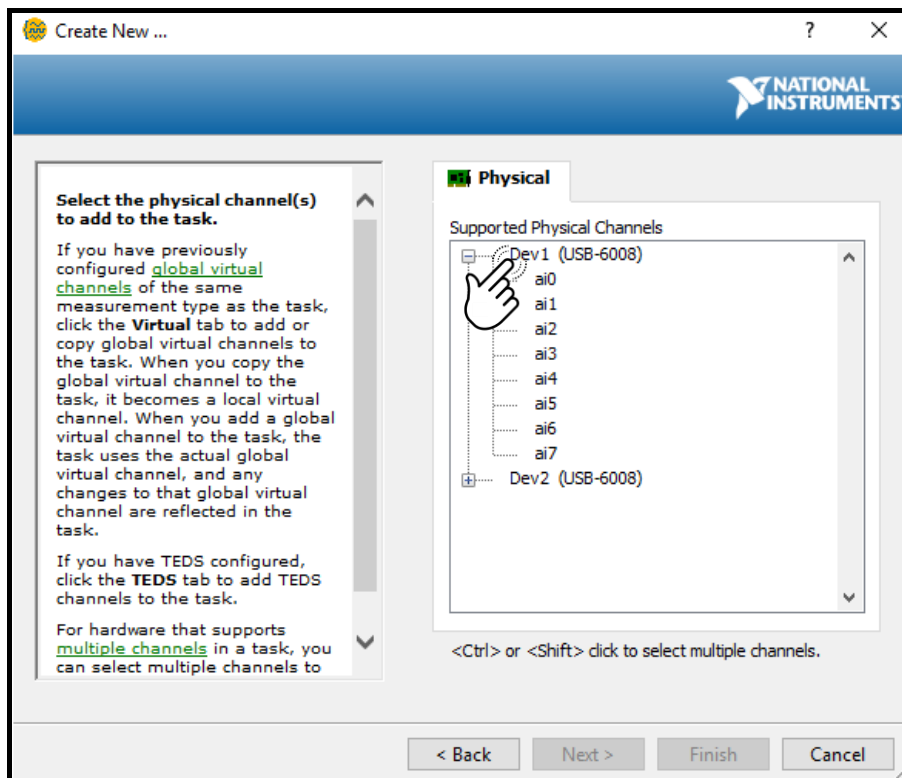
Una vez dentro del asistente de configuración de la tarjeta permite seleccionar si se va a adquirir o generar una señal (Figura 32), en nuestro caso se generará señales analógicas de voltaje de (0-5V) para los transmisores del proceso hacia el PLC y se adquiere señales de control de (0 – 10V) proporcionadas por PLC.



**Figura 32.** DAQ Assistant

### 3.2.1 Adquirir señales analógicas en NI-DAQ 6008

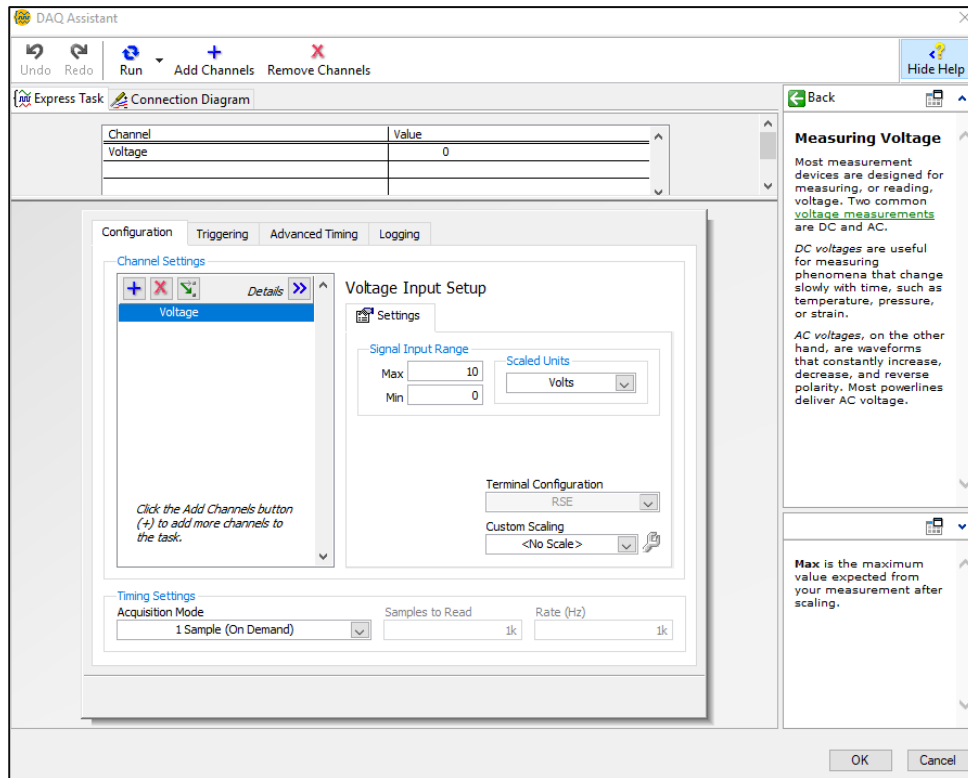
En la ventana anterior (Figura 32) se define que se leerá una señal analógica y esta será de voltaje, seguidamente aparecerá una ventana donde se muestran los canales físicos disponibles en la DAQ (Figura 33). Aquí se toma en cuenta la conexión interna del módulo que se indica en la sección 3.5.



**Figura 33.** Selección del canal de medida en el hardware

Una vez seleccionado el canal físico se procede a la configuración en el modo de adquisición de datos. Para ello se configura los parámetros de rango de señal, tipo de señal, unidades y el tiempo de muestreo, tal como se ilustra en la (Figura 34).





**Figura 34.** Configuración para adquisición de datos

Una vez configurado el canal de la tarjeta se creará un nuevo bloque (Figura 35) que tendrá conexión con el puerto físico de la tarjeta y proporcionará la lectura analógica en tiempo real.

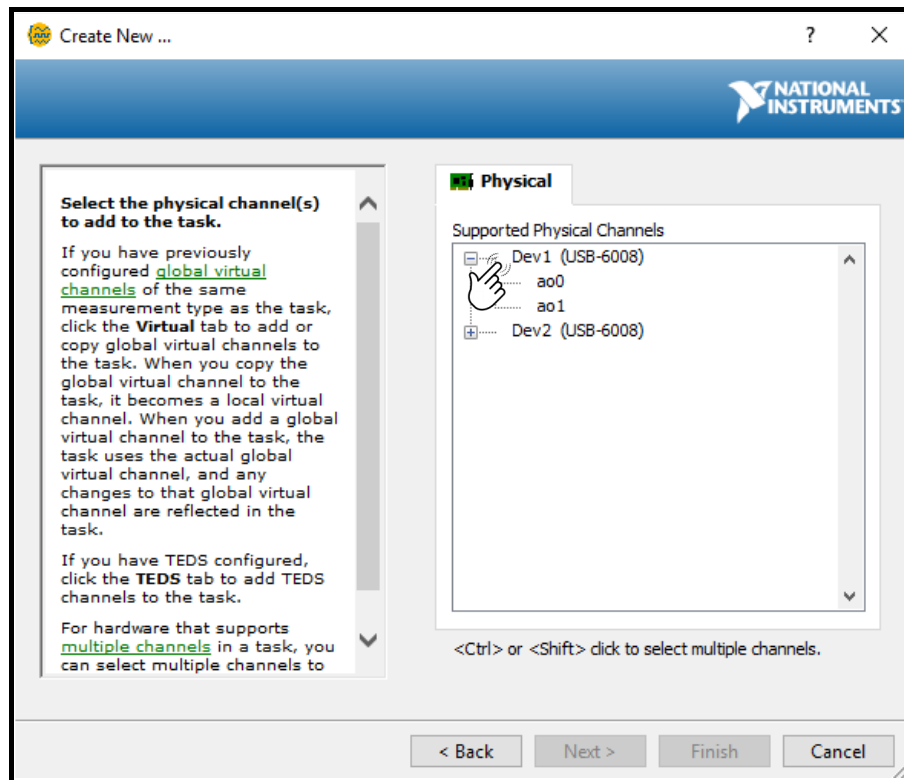


**Figura 35.** DAQ Assistant Configurado para adquisición de datos

### 3.2.2 Generar señales analógicas en NI-DAQ 6008

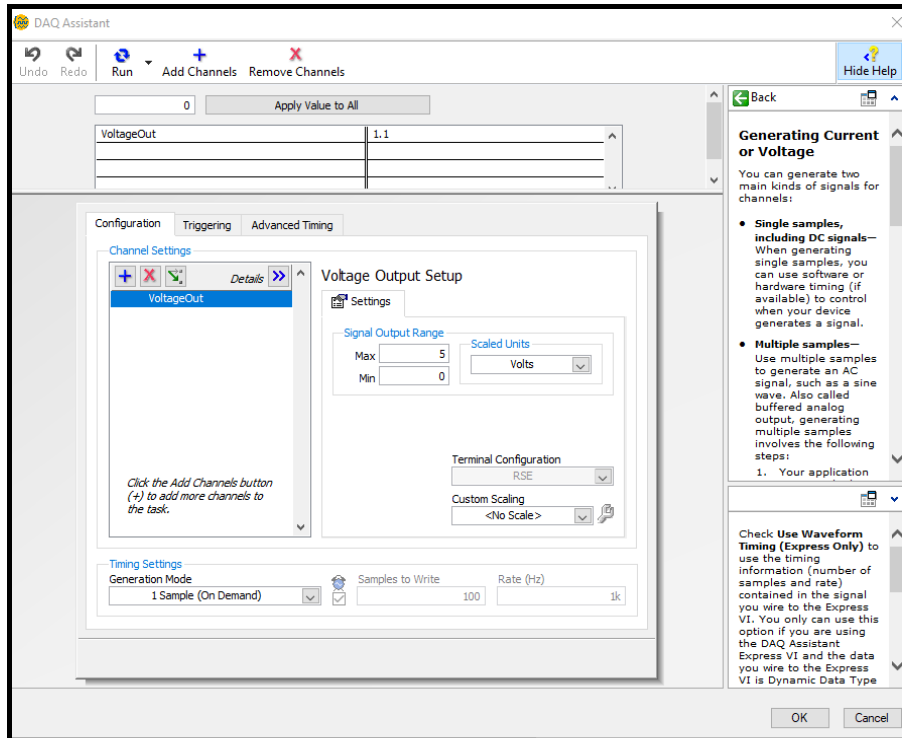
En la ventana de la (Figura 32) se definirá que se generará una señal analógica de voltaje, seguidamente aparecerá una ventana donde se muestran los canales físicos

disponibles que permiten generar señales analógicas en la DAQ (Figura 36). Aquí nuevamente se toma en cuenta la conexión interna del módulo que se indica en la sección 3.5.



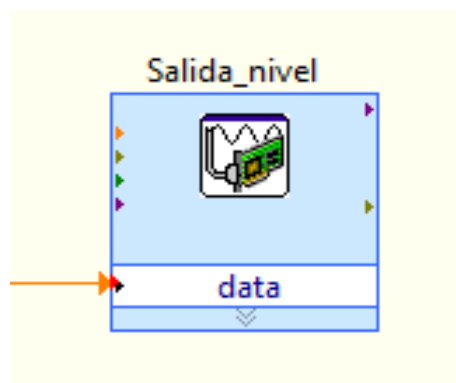
**Figura 36.** Selección del canal de salida en el hardware

Una vez seleccionado el canal físico se procede a la configuración en el modo de escritura de datos. Para ello se configura los parámetros de rango de señal, tipo de señal, unidades y el tiempo de muestreo, tal como se ilustra en la (Figura 37).



**Figura 37.** Configuración para escritura de datos

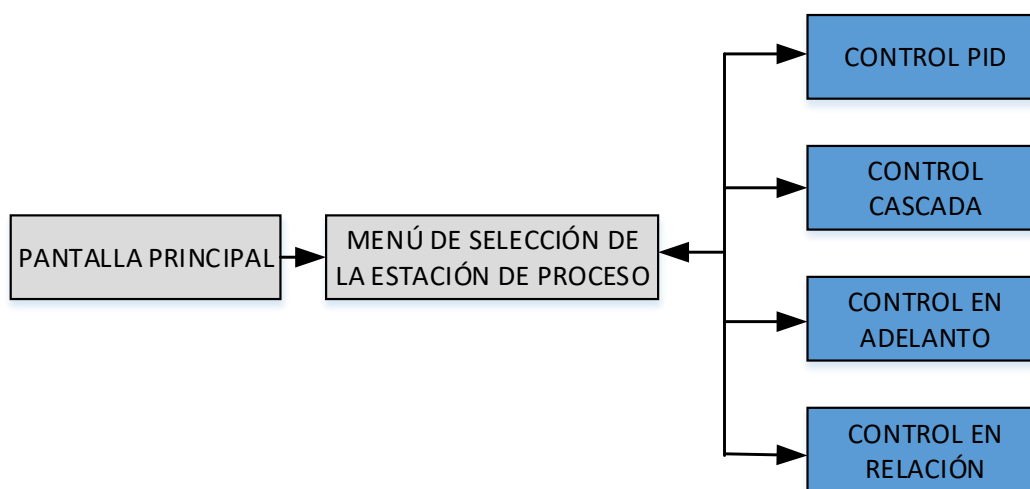
Una vez configurado el canal de la tarjeta se creará un nuevo bloque (Figura 38) que tendrá conexión con el puerto físico de la tarjeta y proporcionará la salida analógica en tiempo real escrito desde LabVIEW.



**Figura 38.** DAQ Assistant Configurado para escritura de datos

### 3.3 Diseño del HMI del simulador

Para explicar el funcionamiento del HMI del simulador de procesos industriales la (Figura 39) muestra el diagrama de bloques de la aplicación, donde inicia con una pantalla principal que describe la presentación del proyecto, luego muestra un menú de selección de estaciones de procesos industriales, que dependiendo del control que se requiera implementar el usuario seleccionara la estación de proceso industrial para ingresar a su simulación, si ya no se requiere ejecutar la simulación es posible parar el proceso.



**Figura 39.** Diagrama de bloques del HMI del simulador de procesos industriales

#### 3.3.1 Pantalla principal

Esta pantalla de primer plano se muestra la presentación del simulador didáctico, además dispone de un botón denominado “Ingresar a menú” que permite ingresar la selección del proceso industrial, de acuerdo al control que se requiera implementar (Figura 40).

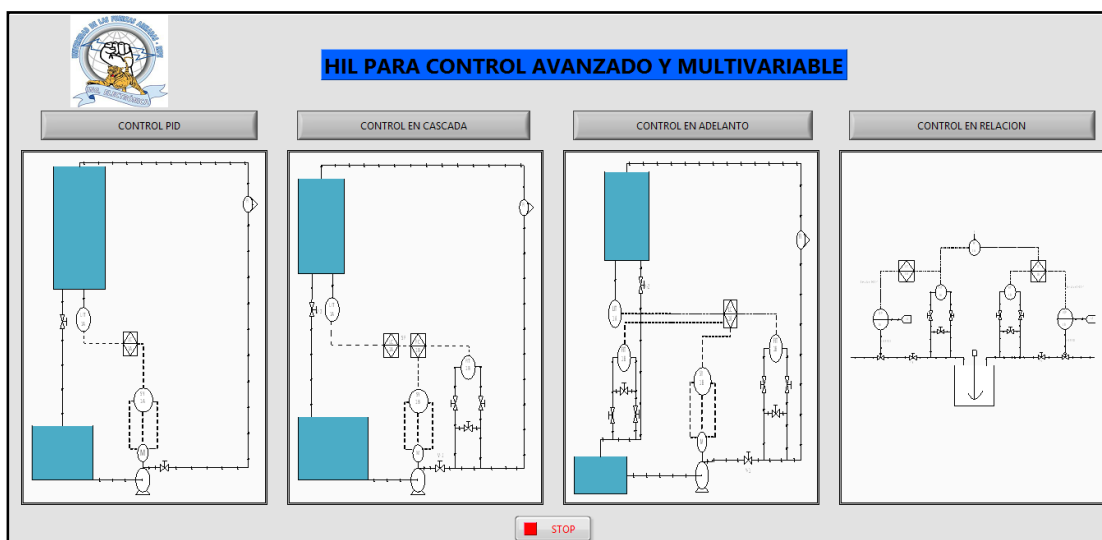


**Figura 40.** HMI de la pantalla principal

### 3.3.2 Menú de selección de estaciones de procesos

#### a) Panel Frontal

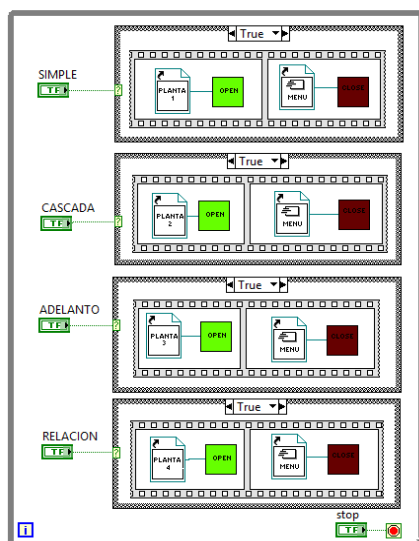
Esta pantalla permite la selección mediante botones de entre cuatro estaciones de procesos industriales para implementar controladores avanzados, mostrando el diagrama PI&D del tipo de control que deberá implementar en el PLC al acceder a determinada ventana (Figura 41).



**Figura 41.** HMI del menú de selección del proceso

## b) Programación del diagrama de bloques

Los botones de selección del menú están conectados a una respectiva estructura de caso. Al oprimir un botón se abrirá el VI de la simulación de la planta correspondiente mediante el subVI “OPEN” y se cerrará el VI del menú mediante el subVI “CLOSE” (Figura 42). Estos subvi's permiten la interacción y se detallan en la sección de control de programa.



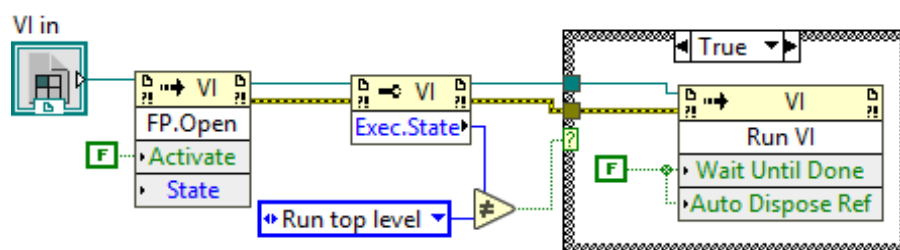
**Figura 42.** Diagrama de bloques del menú de selección del proceso

## c) Control de programa

Para logra una buena interacción con el usuario de las diferentes estaciones de procesos industriales en el proyecto de Labview es necesario abrir, ejecutar y cerrar ventanas, según la manipulación de los controles para ello es necesario crear los subVI's “OPEN” y “CLOSE” que permitan abrir y cerrar VI's.

- **Subvi OPEN**

La programación en el diagrama de bloques del subVI que permite abrir ventanas en LabVIEW se muestra en la (Figura 43), Donde toma el VI de referencia y muestra el panel frontal del mismo para luego verificar si está en ejecución, en caso de no estarse ejecutando inicia la ejecución del VI, similar al botón Ejecutar.



**Figura 43.** Diagrama de bloques del subVI OPEN

- **Subvi CLOSE**

La programación en el diagrama de bloques del subVI que permite cerrar ventanas en LabVIEW se muestra en la (Figura 44), donde el VI que acceda a la función cerrará su panel frontal y se removerá este VI de la memoria de ejecución.

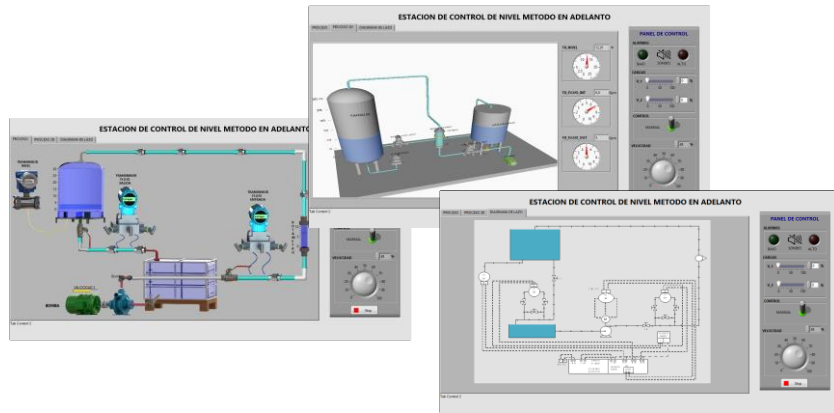


**Figura 44.** Diagrama de bloques del subVI CLOSE

### 3.3.3 HMI de las estaciones de procesos

El HMI de la simulación independientemente del proceso seleccionado muestra tres pestañas que contienen el modelo de la planta bidimensional, tridimensional y el diagrama de lazo para la implementación del controlador en la planta, además de un panel de control donde se visualizan las alarmas, el control de las cargas que representan

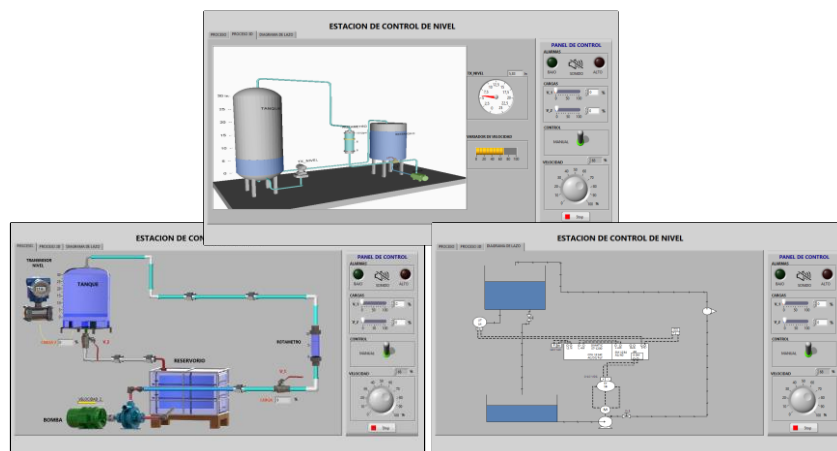
la apertura y cierre de las válvulas de 0 al 100%, un selector de control manual o automático y por ultimo un control de los actuadores en modo manual, como muestra la (Figura 45).



**Figura 45.** HMI de simulación de una de la estación de procesos

### 3.4 Estación de nivel para control PID

El panel frontal del HMI implementado se muestra en la (Figura 46), que simula la estación del proceso nivel con un elemento de medida o transmisor, este proceso permite implementar un lazo de control únicamente de nivel.



**Figura 46.** HMI de la estación de control de nivel



El diagrama a bloques (DB) del simulador de la estación de nivel para control PID se muestra en la (Figura 47), que se describe en cuatro etapas que son la dinámica del proceso, la estación en 3D, alarmas y la estación bidimensional.

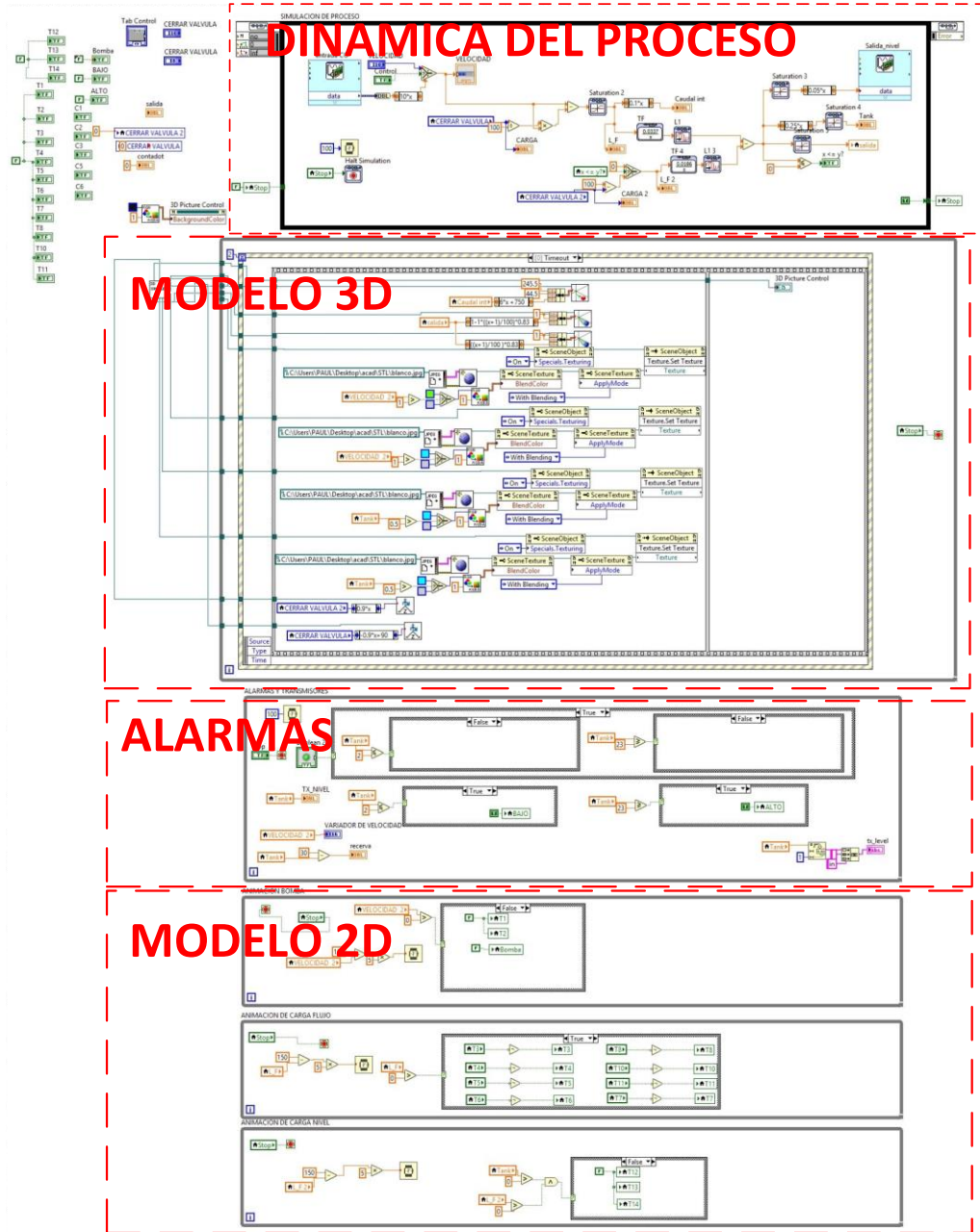
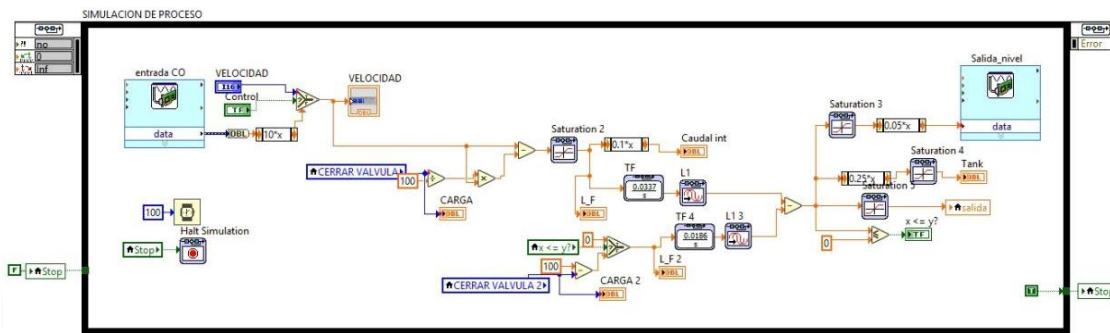


Figura 47. DB del HMI de la estación de nivel para control PID

### a) Dinámica del proceso

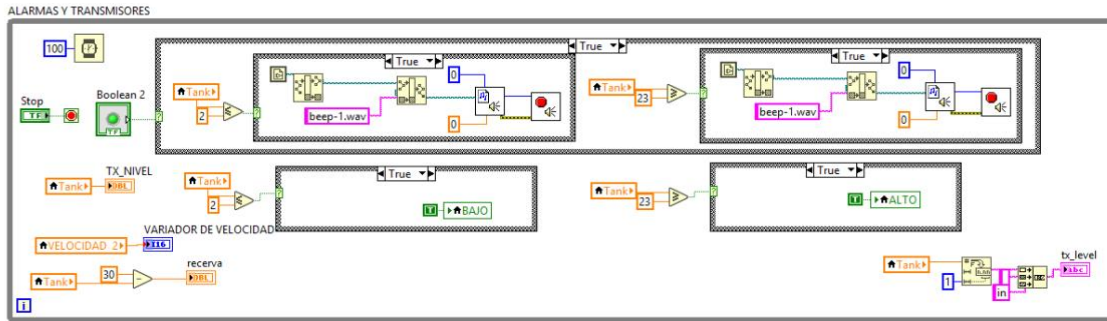
La (Figura 48) muestra el lazo de simulación del módulo Control & Desing Simulation de LabVIEW, donde se genera la dinámica en tiempo real de los procesos autorregulados e integrantes obtenidos anteriormente, haciendo uso de los boques de función de transferencia “Transfer Function” y retardo “Transport delay”. Además de aceptar señales de control y responder señales del proceso interactuando con el exterior gracias a los bloques de adquisición y generación de señales disponibles en la DAQ.



**Figura 48.** Lazo de simulación de la dinámica del proceso

### b) Alarmas

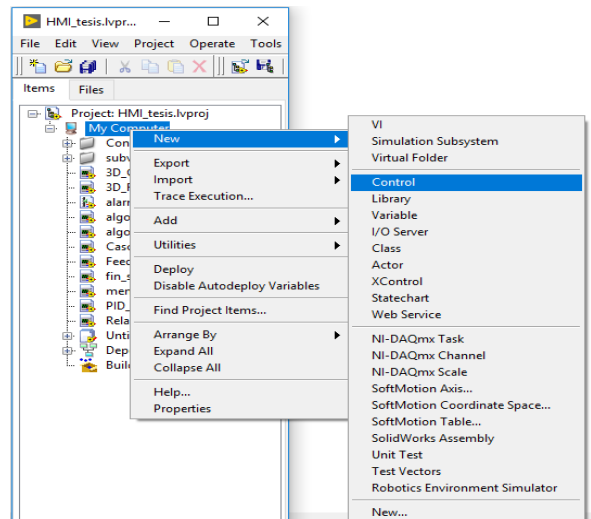
La (Figura 49) muestra el lazo donde se ejecutan las alarmas en el proyecto, estas indican cuando el nivel del tanque entra en los rangos mínimos y máximos permitidos, para ello se basa en condiciones que provocan el encendido y apagado de indicadores alto y bajo del nivel del tanque, también la generación sonido de la alarma se logra cargando un archivo (WAV) y haciendo uso de los bloques de sonido para ejecutarlo.



**Figura 49.** Lazo de alarmas y sonidos

### c) Modelo 2D

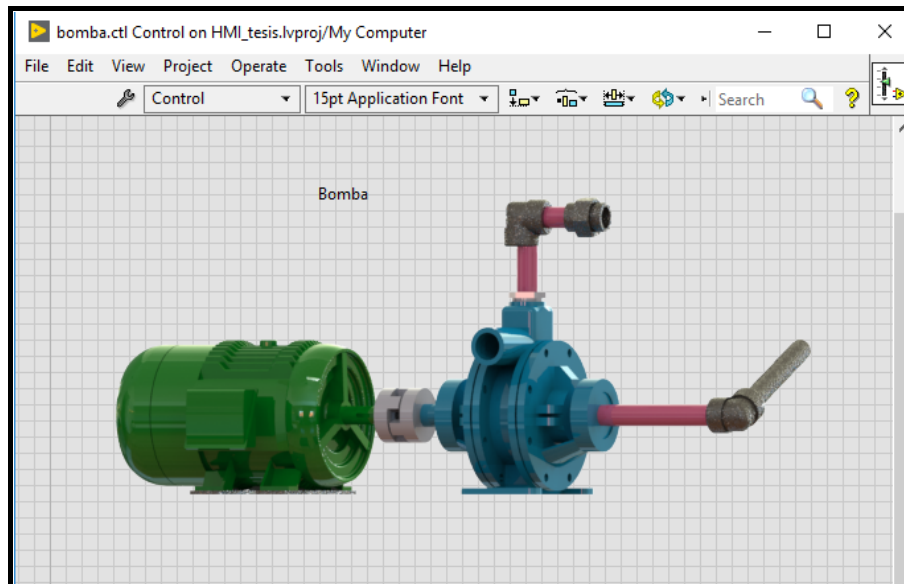
LabVIEW dispone del módulo DSC que contiene un amplio catálogo de imágenes de procesos industriales además es posible añadir imágenes que estén en la memoria del ordenador. Para lograr acciones de movimiento en grafico bidimensionales, es necesario cambiar las propiedades graficas de controles o indicadores ya sean booleanos o numéricos, para ello es necesario crear un nuevo control dentro del proyecto, como indica la (Figura 50).



**Figura 50.** Creación de un nuevo control

Se observa que se abre un nuevo panel frontal donde se añade un solo control, para luego proceder a editar su nueva presentación, accediendo a “Change to Customize Mode”, donde permite añadir nuevas imágenes a cada uno de los estados de los

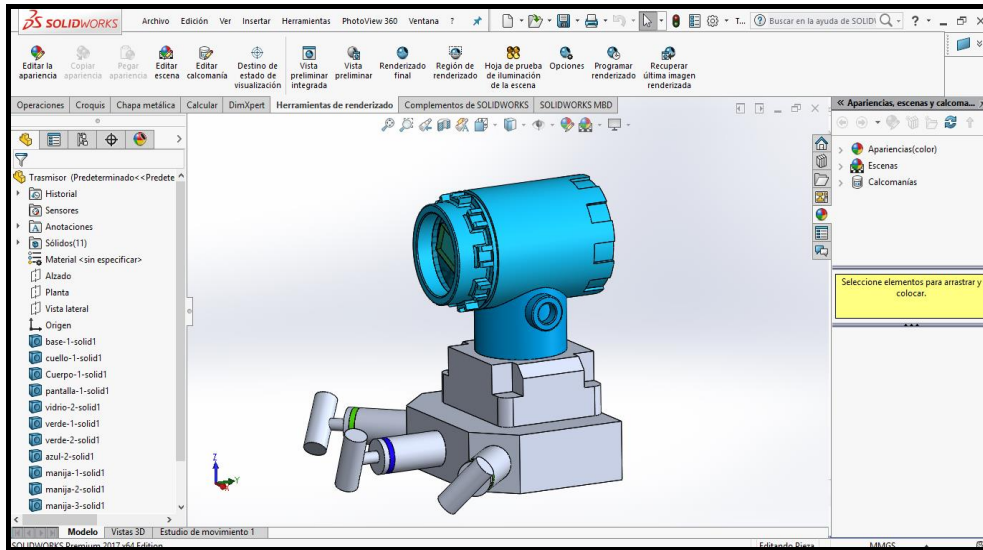
controles, la (Figura 51) muestra un control booleano que simulara el movimiento de una bomba de agua.



**Figura 51.** Personalización de un control

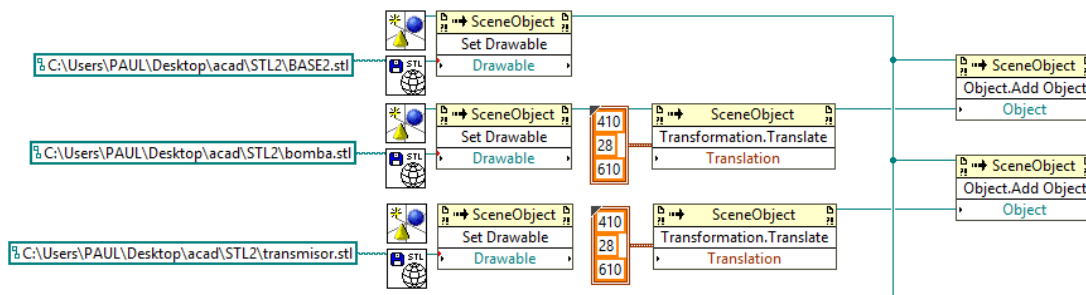
#### **d) Modelo tridimensional en Labview**

El software LabVIEW permite manipular y animar un objeto tridimensional en una ventana de escena 3D propia, a continuación se describe la animación de la estación tridimensional, para ello es necesario crear los objetos en algún programa de dibujo CAD, en este caso se usó el software Solidworks donde se dibujó y ensambló la estación de proceso para luego guardar por separado todas sus partes (Figura 52), es decir tanques, transmisores, rotámetros, tuberías y actuadores en archivos con extensión StereoLithography (.STL).



**Figura 52.** Dibujo de un transmisor en Solidworks

Teniendo todos los archivos tridimensionales en una capeta, en el software Labview y usando la herramienta de 3D Picture Control, mediante el método “Set Drawable” se exporta cada una de las geometrías STL a un objeto LabVIEW 3D permitiendo manipularlos de forma individual con las propiedades y métodos del control disponibles, usando el método “Add objet” se agrega todos los objetos a una escena 3D, la (Figura 53) muestra parte de los archivos exportados.

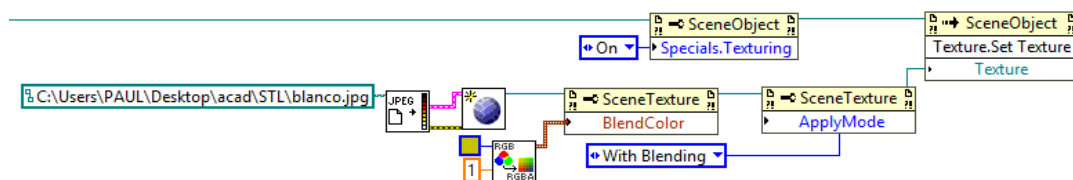


**Figura 53.** Exportar modelos 3D a LabVIEW

Debido a que todos los objetos tridimensionales se exportan en color gris, es necesario asignar colores a ciertos objetos tridimensional para darle una animación realista como: un rotámetro donde la cantidad de flujo es representada por el desplazamiento de un indicador de color amarillo, una bomba donde su activación es de

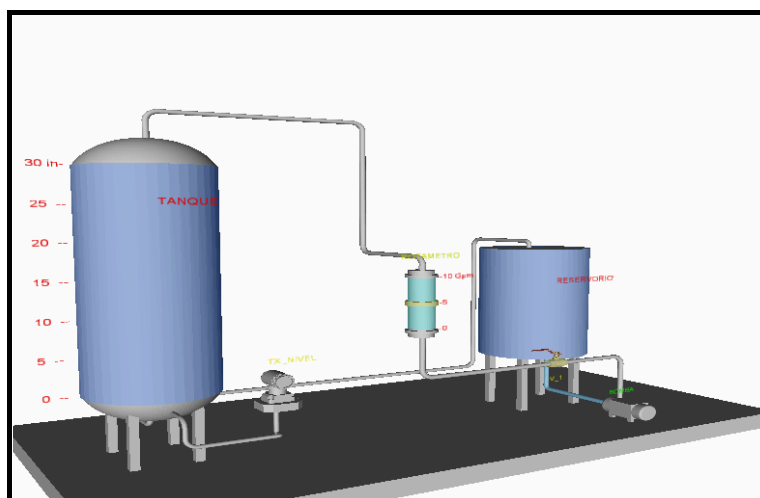
color verde, los tanques simulan el nivel de agua en color azul, las tuberías cambian a color celeste para indicar el flujo de agua que circula, además de válvulas manuales amarillas que simulan las cargas que el usuario aplique.

Para logra asignar un color determinado a un objeto tridimensional, LabVIEW brinda métodos y funciones para dicho fin, para ello una vez cargado el archivo tridimensional a la salida del “Scene Object” se añade una textura y se carga un imagen totalmente blanca en formato JPG, para luego asignar mediante el bloque de colores el color deseado finalmente se aplica la textura y color al objeto deseado, la (Figura 54) muestra el diagrama de bloques para asignar un color deseado a un objeto 3D.



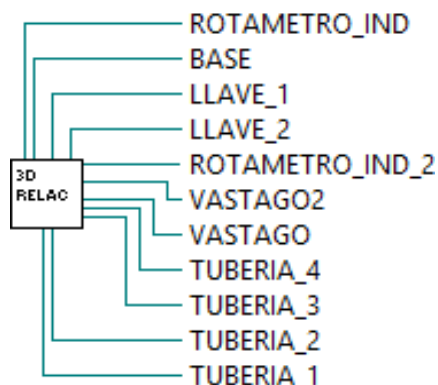
**Figura 54.** Asignar color a un objeto 3D

Una vez realizado el procedimiento anterior en el panel frontal del LabVIEW usando una escena 3D, se puede visualizar que la estación de proceso industrial se ha cargado y coloreado los objetos deseados, como muestra la (Figura 55).



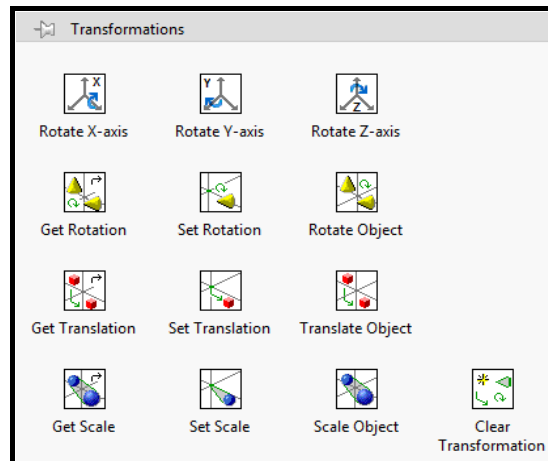
**Figura 55.** Escena tridimensional de la estación

Es necesario crear un subVI (Figura 56) para la simulación de cada proceso industrial, cuya función será cargar de la carpeta específica todos los archivos STL, colorearlos y devolver los objetos 3D que se requiera animar, evitando que el programa principal sobrecargue su procesamiento en la función antes mencionada y presente la escena tridimensional con mayor fluidez.



**Figura 56.** SubVI de escena tridimensional

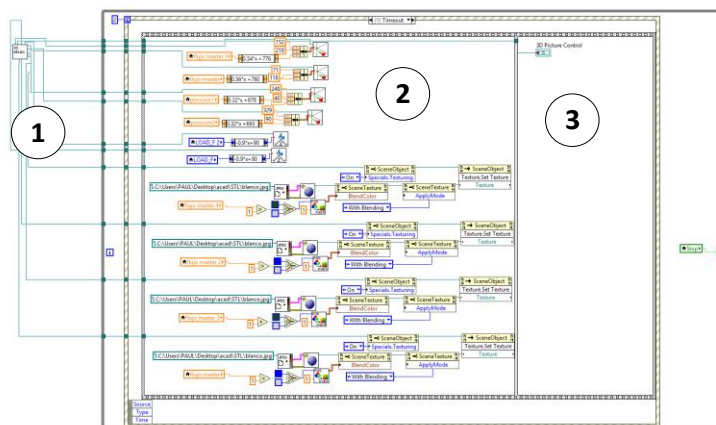
Para lograr la animación de los procesos industriales como: llenado y vaciado de los tanques, llenado de tuberías, apertura y cierre de válvulas, movimiento de rotámetros, etc. Se logra mediante las funciones de transformación de objetos que dispone “3D Picture Control” (Figura 57), donde su menú presenta herramientas de rotación, traslación y escalamiento permitiendo cambiar el tamaño, la orientación o la ubicación de un objeto en una escena 3D, es por ello que fue necesario independizar cada parte del dibujo de la estación.



**Figura 57.** Herramientas de transformación para objetos 3D en LabVIEW

En la (Figura 58) se muestra el diagrama de bloques para lograr la animación de la estación de procesos tridimensional, para ello el proceso se describe dividiendo en tres partes:

- 1) Se carga el SubVI de la estación tridimensional al nuevo proyecto.
- 2) Se modifica las características de ciertos objetos dentro una estructura de eventos para logra la interacción y animación necesaria, dependiendo de las órdenes del controlador.
- 3) Finalmente, la estación de proceso es proyectada hacia el usuario en una escena tridimensional.

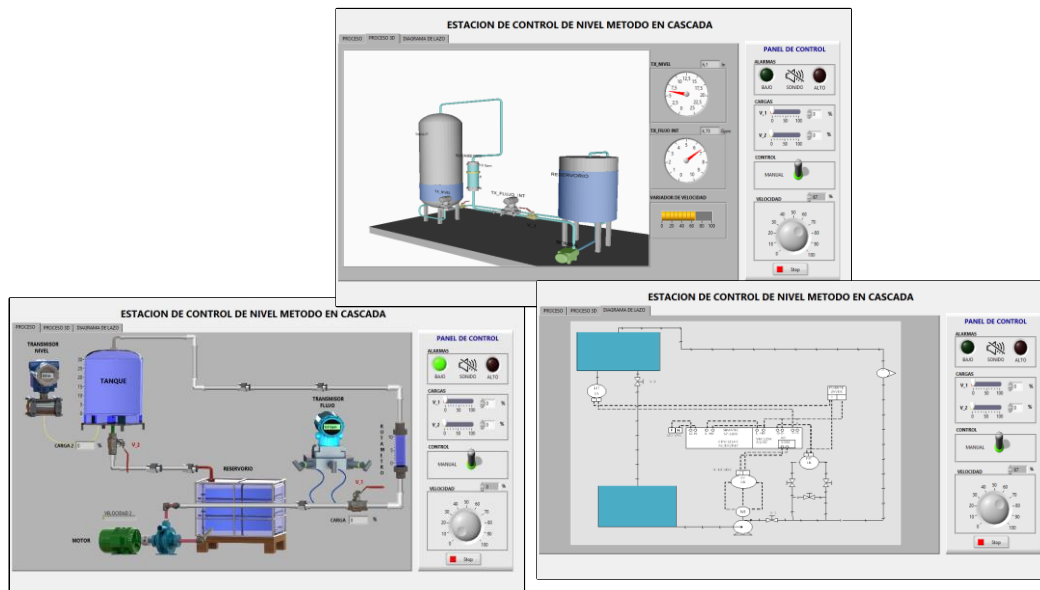


**Figura 58.** Animación de objetos tridimensionales



### 3.5 Estación de nivel para control en cascada

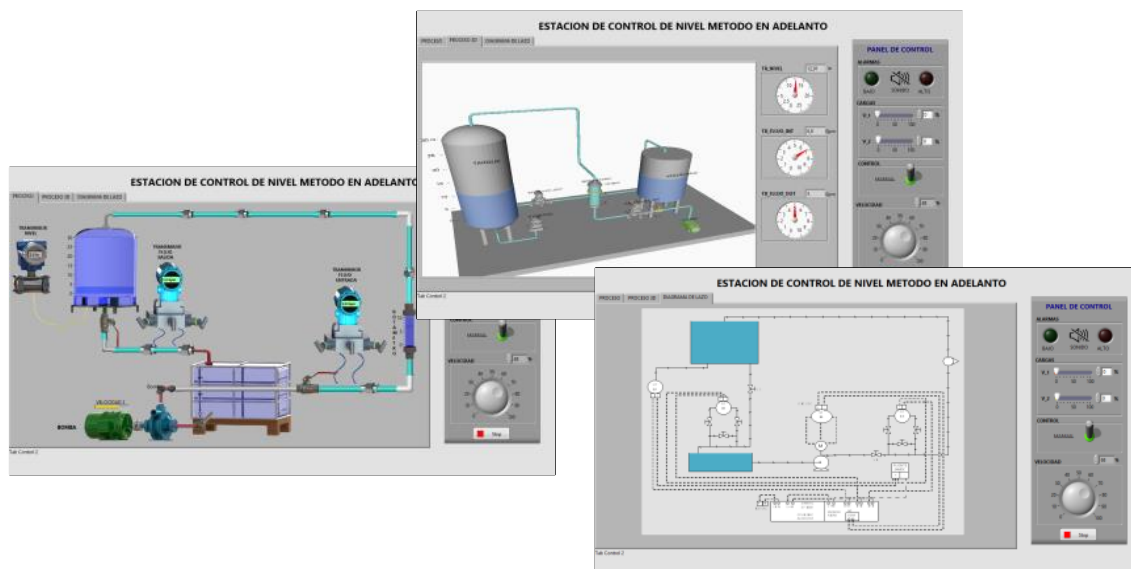
El panel frontal del HMI implementado se muestra en la (Figura 59), que simula la estación del proceso nivel con dos elementos de medida uno de flujo de entrada y otro de nivel, este proceso permite implementar un lazo de control flujo/nivel.



**Figura 59.** HMI de la estación de control de nivel método cascada

### 3.6 Estación de nivel para control en adelanto

El panel frontal del HMI implementado se muestra en la (Figura 60), que simula la estación del proceso nivel con tres elementos de medida siendo estos: el flujo de entrada al tanque, el flujo de salida del tanque y el nivel del tanque, este proceso permite implementar un lazo de control del flujo de entrada, flujo de salida y nivel.



**Figura 60.** HMI de la estación de control de nivel método en adelanto

### 3.7 Estación para control en relación.

El panel frontal del HMI implementado se muestra en la (Figura 61), que simula la estación del proceso de caudales con dos elementos de medida de flujo y dos actuadores, es decir un sistema MIMO, este proceso permite implementar un lazo de control en relación.

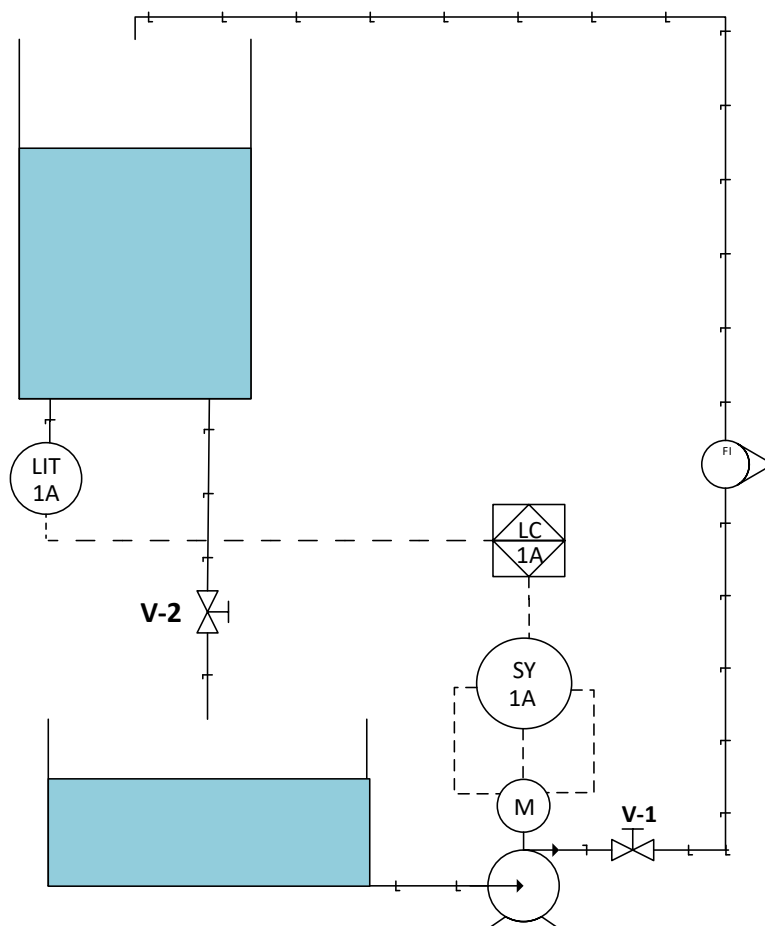
### 3.8 Diseño de controladores

Para obtener un funcionamiento óptimo del control, en el simulador de procesos industriales se implementaron acciones de control como el control PID, cascada, adelanto y relación, tomando en cuenta la correcta sintonización de cada uno de los lazos de control.

#### 3.8.1 Control proporcional integral derivativo para la estación nivel

En el diagrama P&ID de la (Figura 61) para controlar el nivel del tanque se utiliza el control proporcional integral derivativo. El transmisor de nivel está localizado en la parte inferior del tanque este envía una señal de 0 a 5V hacia el controlador el cual ejecuta una

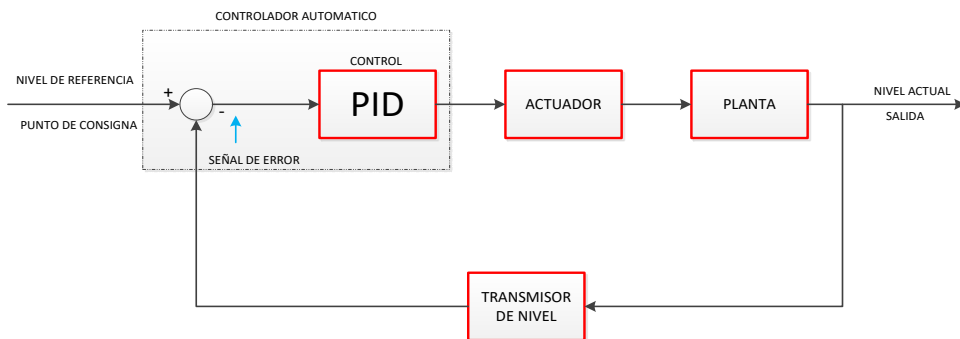
acción de control sobre el variador de velocidad. La acción de control determina la velocidad de giro del motor. De esta manera se logra controlar el flujo de entrada que se dirige al tanque y en consecuencia el nivel del mismo.



**Figura 61.** Diagrama P&ID del control PID para la estación de nivel

El diagrama de bloques del control PID de nivel de la planta se indica en la (Figura 62). Se establece un nivel de referencia en pulgadas para el tanque. El nivel real del tanque es medido por el transmisor y comparado con el nivel de referencia y así obtener la señal de error que posteriormente se envía al bloque del control que llevará a cabo la acción de control.

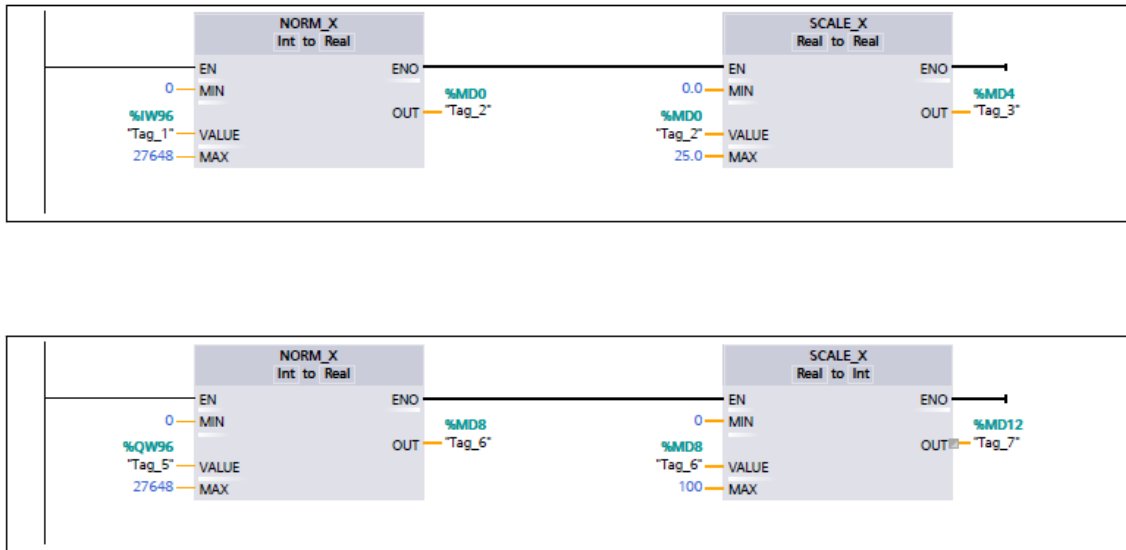
La acción de control genera una señal de corriente que es enviada hacia el variador el cual produce una cantidad de voltaje para que la bomba realice un cambio en el flujo de entrada hacia el tanque para que a su vez exista un cambio de nivel en el mismo.



**Figura 62.** Diagrama de bloques del control PID

Si el nivel de referencia es menor que el nivel real del tanque, el variador deberá enviar menor voltaje hacia la bomba para que el flujo de entrada sea menor que el flujo de salida para que de esta forma el nivel en el tanque disminuya. Después de que el nivel real sea igual al nivel de referencia, el flujo de entrada deberá permanecer igual al flujo de salida para mantener constante el nivel del tanque, cualquier variación en el flujo de entrada dependerá de la señal de error que se envíe al bloque de control.

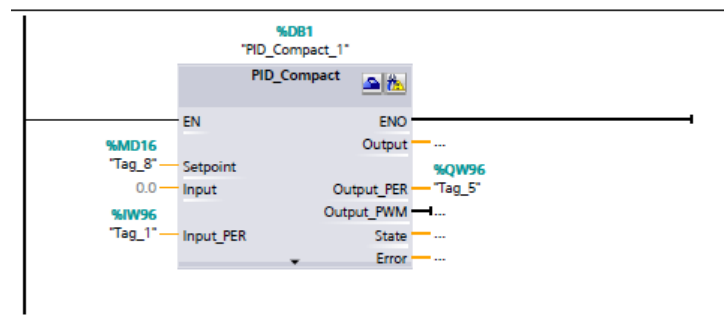
La implementación del controlador se realizó en el software TIA Portal V13 de Siemens, para lo cual las señales en las entradas y salidas analógicas fueron normalizadas de acuerdo al nivel de tensión que entrega la DAQ, y escaladas de acuerdo al rango establecido en el proceso como se indica en la (Figura 63).



**Figura 63.** Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas.

La lectura de la señal, de la simulación del transmisor de nivel es recibida por la entrada %IW96 y la acción de control es enviada a través de la salida %QW96.

En la (Figura 64) se muestra la creación del bloque PID, donde este fue configurado en los ajustes básicos para trabajar con la variable nivel, la asignación de la entrada de la señal fue en el parámetro Input\_PER y para la salida en Output\_PER, el punto de ajuste fue en el Setpoint.

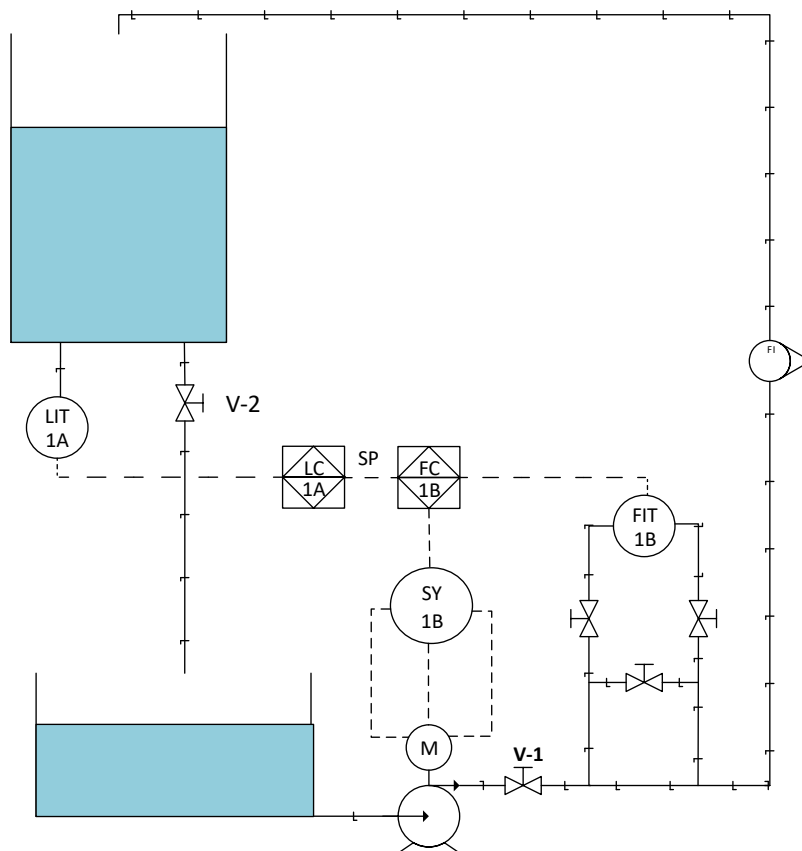


**Figura 64.** Bloque PID para el Control PID

### 3.8.2 Control en cascada para la estación de nivel

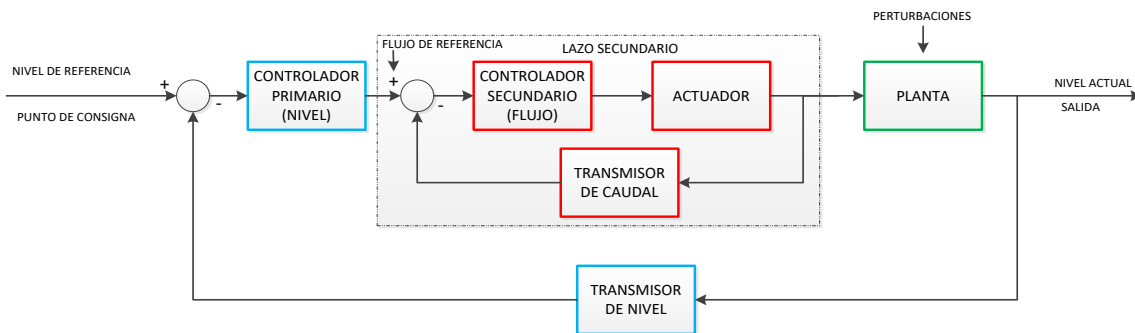
El control en cascada es una acción de control utilizada cuando se produce perturbaciones que alteran la variable del proceso, este esquema consta de dos lazos como se muestra en la (Figura 65), un lazo primario con un controlador maestro y un lazo secundario con un controlador esclavo. Este lazo secundario debe eliminar las perturbaciones antes de que afecten al proceso.

La salida del controlador maestro es nuestra señal de referencia para el lazo secundario. La ventaja de utilizar este lazo secundario es que, si se produce un cambio en su variable controlada, este lazo actúa con gran rapidez eliminando la perturbación antes de que su efecto se note en la variable principal, esto lleva a que el control sea más eficiente.



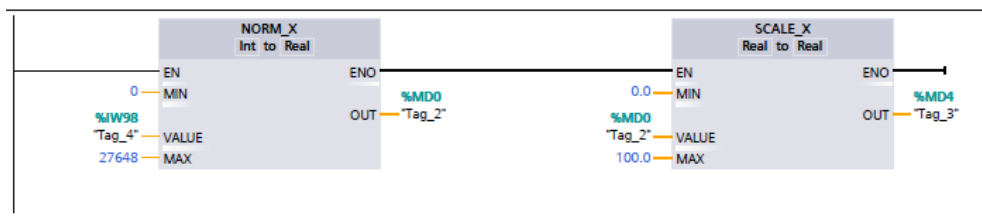
**Figura 65.** Diagrama P&ID del control en cascada para la estación de nivel

El diagrama de bloques del control en cascada se presenta en la (Figura 66), en donde el usuario fija un nivel de referencia y el transmisor del lazo primario envía el nivel real del tanque, la señal de error que se genera al comparar estos dos niveles, se envía al controlador primario y determina el flujo de salida (flujo de referencia). El transmisor del lazo secundario envía el flujo real y a su vez el controlador secundario compara el flujo de referencia con el flujo real y ejecuta una acción de control sobre el variador de velocidad, cuyo efecto se ve reflejado en el flujo que circula en las tuberías de la planta. Entonces si se presenta una perturbación en el flujo de entrada el controlador secundario sería capaz de reducir el efecto que se produciría en el nivel del tanque.

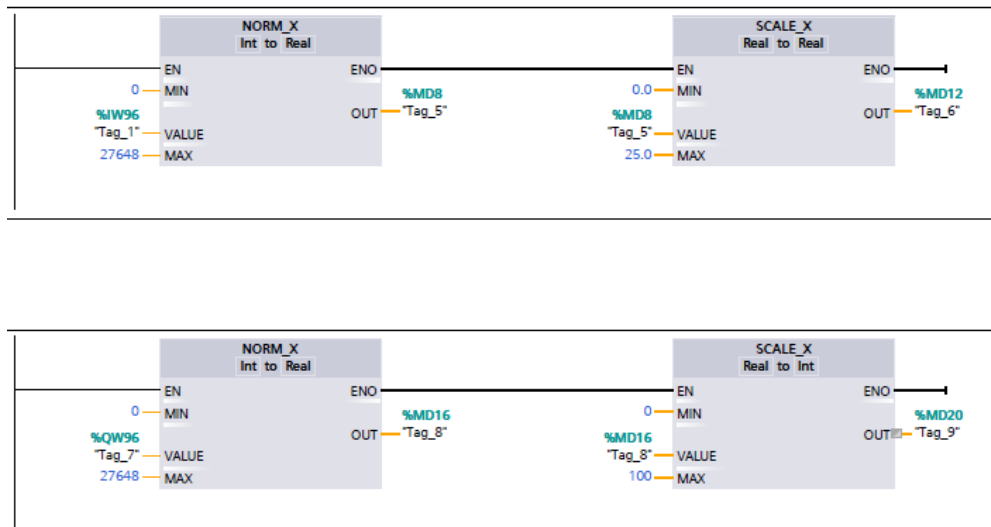


**Figura 66.** Diagrama de bloques del control en cascada

Para implementar el control en cascada se agregó una entrada analógica para el lazo secundario como se indica en la (Figura 67), esta entrada extra es la encargada de recibir la señal del transmisor de flujo simulado, a través de %IW98.

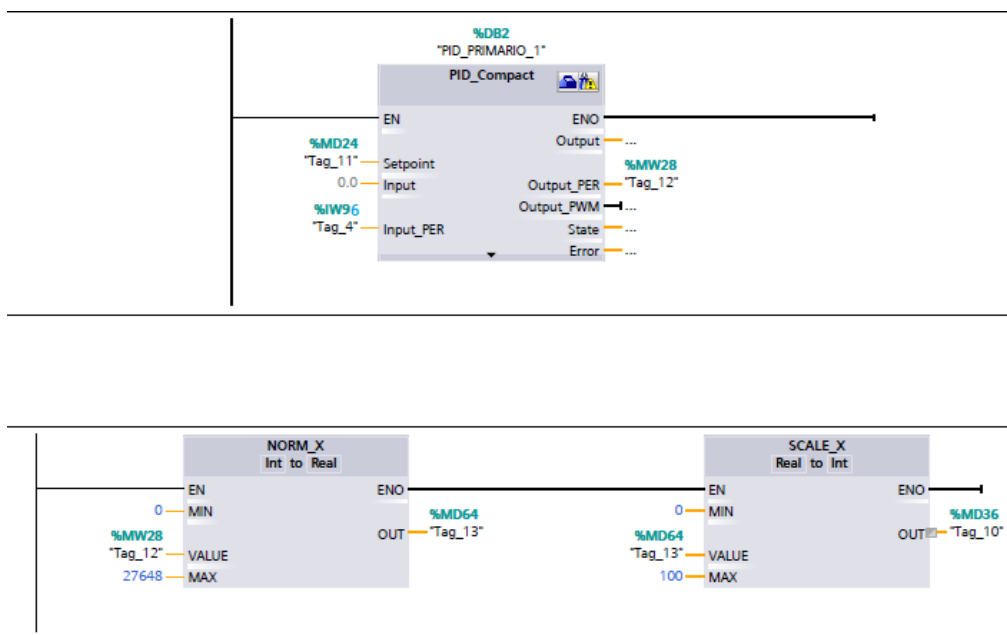


**CONTINÚA** ➡



**Figura 67.** Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas para el control en cascada.

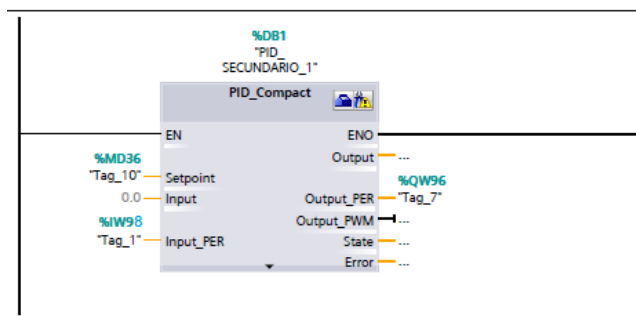
En el bloque PID de lazo primario (Figura 68), es donde vamos a recibir la señal del transmisor de nivel, y su salida será enviada por medio de %MW28, debido a que la salida es por el parámetro Output\_PER es necesario normalizar y escalar al rango de trabajo de la variable flujo, donde esta señal escalada será el flujo de referencia para el lazo secundario.



**Figura 68.** Bloque PID del lazo Primario



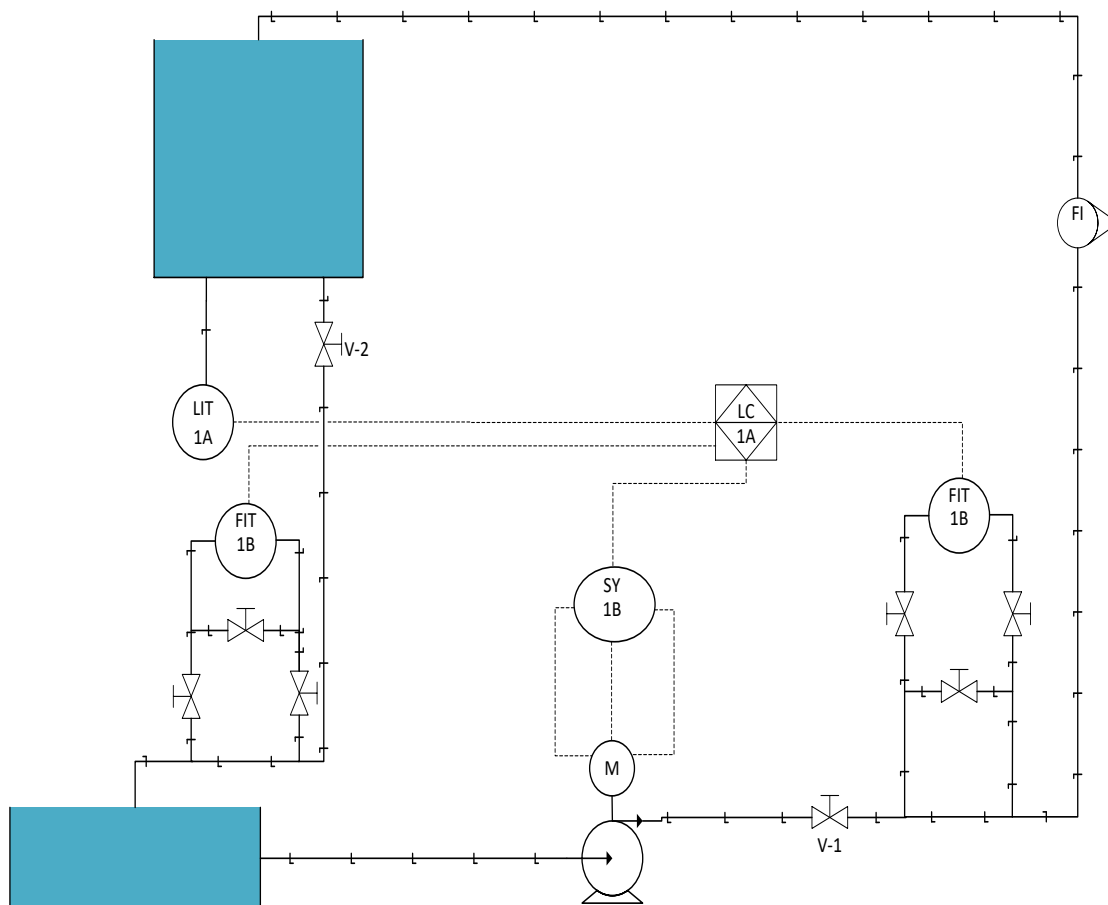
En la (Figura 69), se muestra la al bloque PID secundario que es el encargado de comparar el flujo de referencia de la marca %MD36 con el flujo real medido por %IW98 y determinar qué acción de control ejecutara.



**Figura 69.** Bloque PID del lazo secundario

### 3.8.3 Control en adelante para la estación de nivel

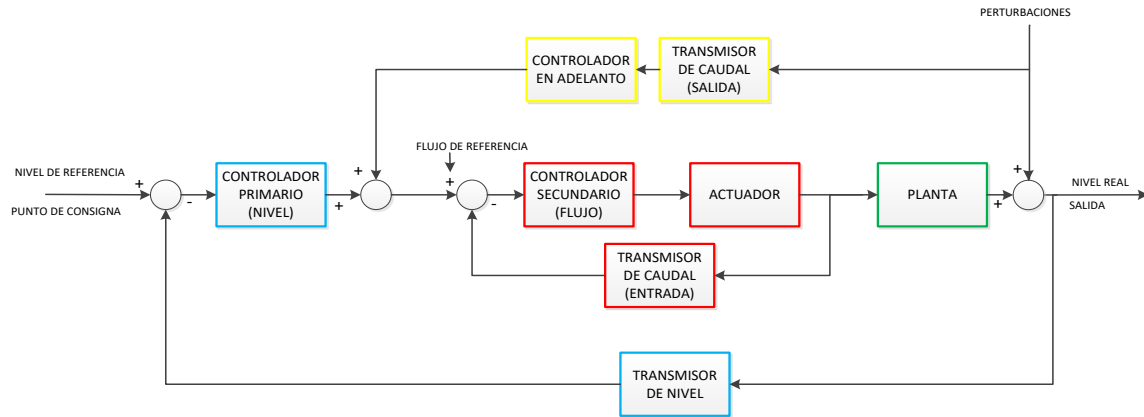
El control en adelante, al contrario que el control en cascada y el control proporcional integral derivativo, no espera tener una señal error, sino que actúa directamente sobre las perturbaciones de la variable del proceso, este tercer transmisor de flujo a la salida del proceso que se indica en la (Figura 70) puede usarse como señal de anticipación hacia la acción de control del tanque de nivel.



**Figura 70.** Control en adelanto para la estación de nivel.

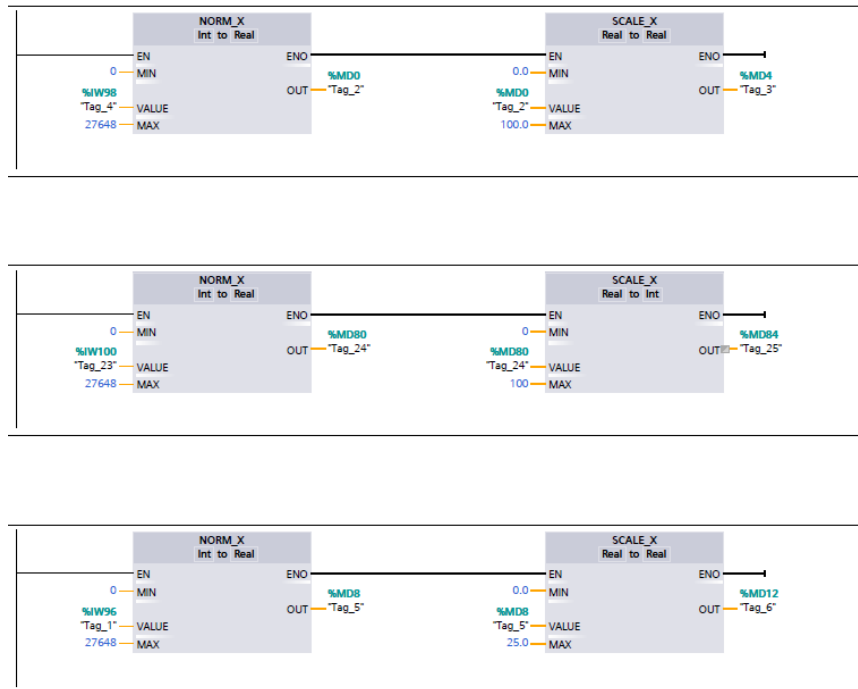
La señal de anticipación se agrega a la salida del controlador primario para ajustar el flujo de referencia, la diferencia entre el flujo de referencia y el flujo real se envía directamente al punto de ajuste del controlador secundario. Por lo tanto, si el flujo de salida aumenta considerablemente, el nuevo punto de ajuste del controlador secundario aumentará exactamente a la cantidad del flujo de salida.

Considerando que, si las medidas del flujo de salida y el flujo de entrada son exactamente los mismos, el controlador secundario compensará exactamente el agua necesaria para mantener el nivel deseado del tanque sin producir cambios en el lazo primario, como muestra la (Figura 71).



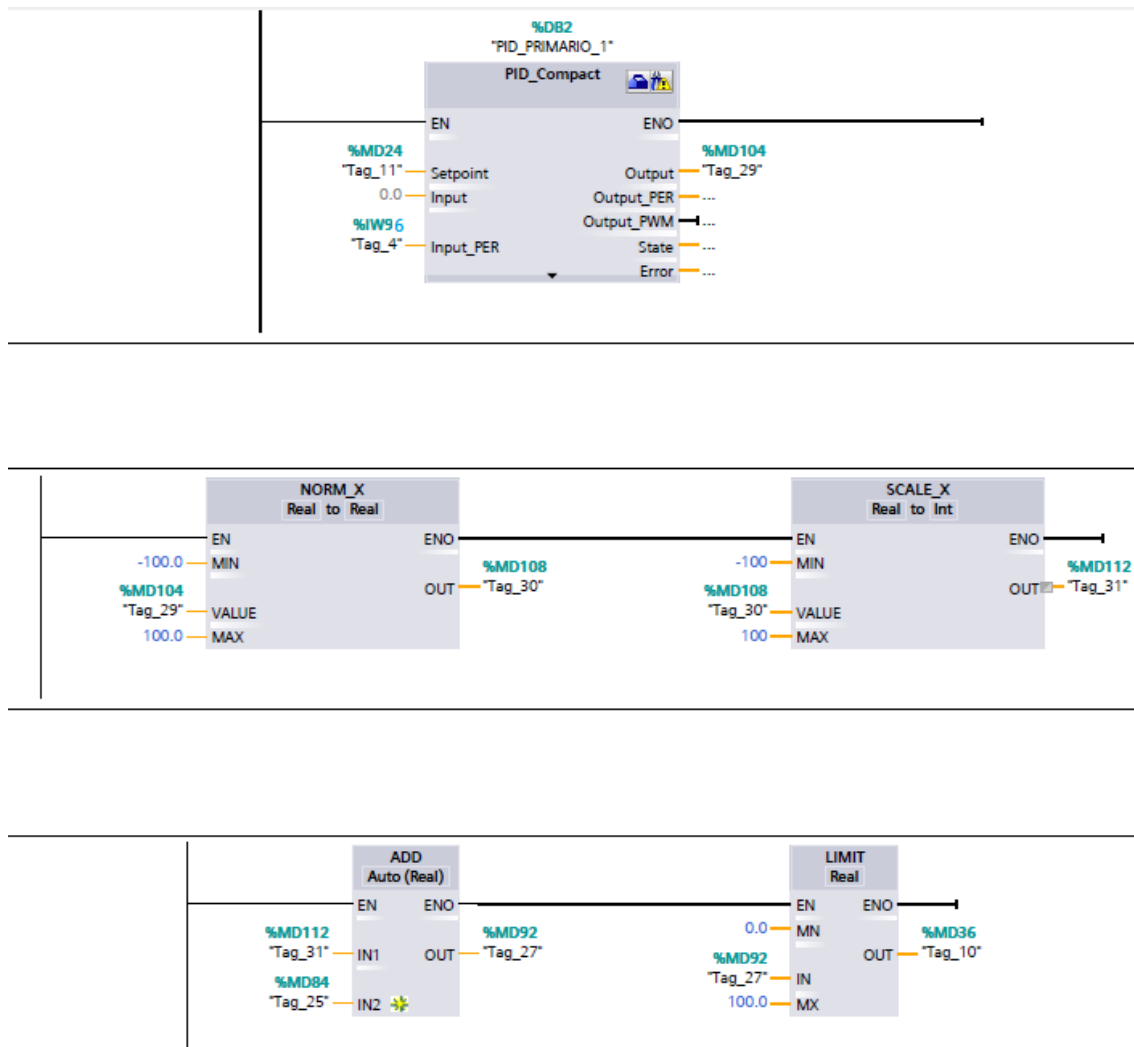
**Figura 71.** Diagrama de bloques del control en adelanto

En la implementación del controlador en adelanto, se agregó otra entrada analógica para el transmisor de flujo el cual será colocado a la salida del proceso puesto que esta señal es utilizada como de anticipación, su lectura es por medio de %IW100 (Figura 72).



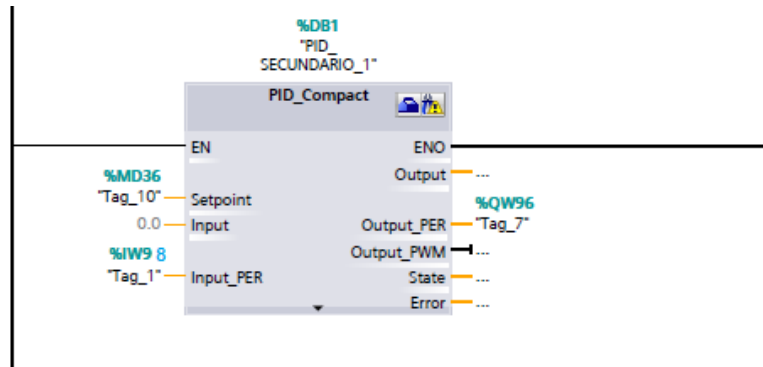
**Figura 72.** Normalización y escalamiento de las entradas y salidas analógicas para el control en adelanto.

La señal de anticipación del transmisor es agregada al final de la programación por %MD84 para ajustar el nuevo flujo de referencia como se indica en la (Figura 73).



**Figura 73.** Bloque PID del lazo primario con la señal de anticipación

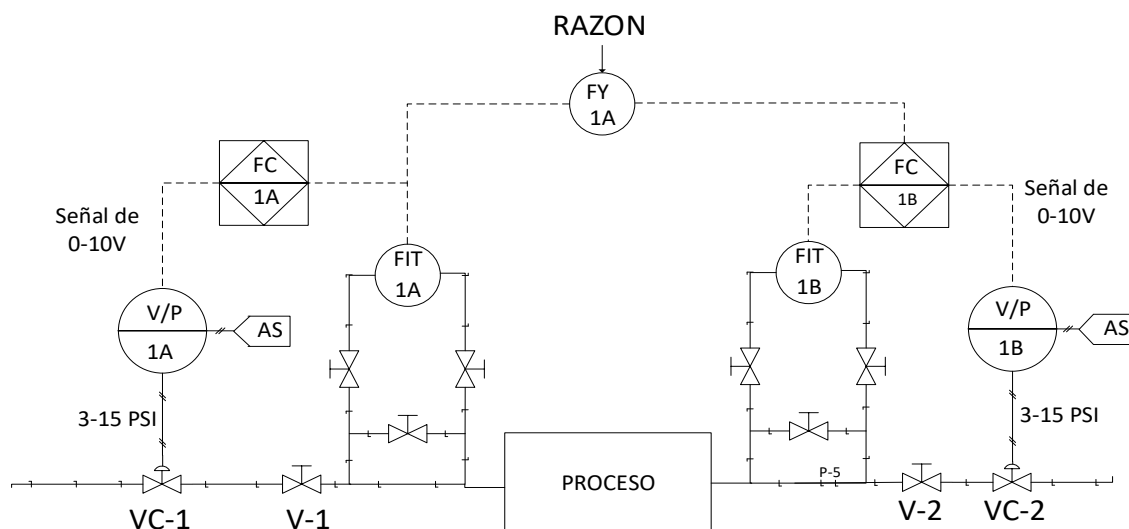
El flujo de referencia es enviado al bloque secundario (Figura 74), donde se compara con el flujo real para ejercer una acción de control y mantener el flujo de salida igual al flujo de entrada.



**Figura 74.** Bloque PID del lazo secundario para el control en adelanto

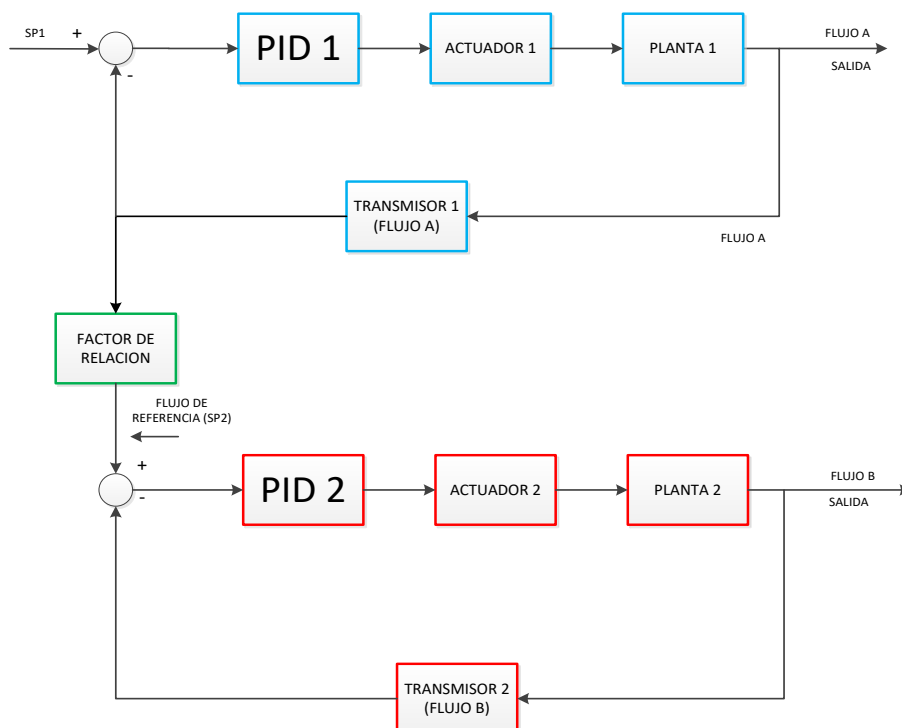
### 3.8.4 Control en relación para la estación de flujo

Su objetivo es regular la relación que existe entre dos o más variables, en la planta el objetivo es buscar una razón entre flujo medido por el transmisor del lazo 1A y por el flujo del transmisor del lazo 1B. El factor de relación no es más que un multiplicador que se selecciona dependiendo de las necesidades que presente el proceso de mezcla. Se utiliza en ambos lazos un controlador debido a que las variables pueden ser medidas y controladas, como muestra la (Figura 75).



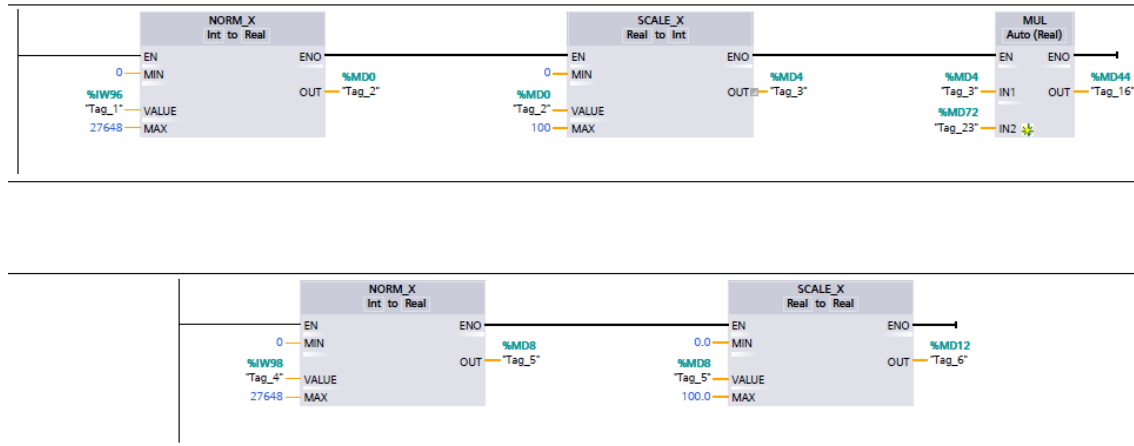
**Figura 75.** Diagrama P&ID del control en relación para la estación de flujo

El flujo A es medido por un transmisor 1 y esa señal se envía para ser multiplicada por el factor de relación que es introducido por el usuario. El resultado obtenido es un flujo de referencia que será el punto de ajuste en el lazo del flujo B. El flujo de referencia es comparado con el flujo B y a partir de esa comparación obtenemos una señal de error que es enviada al bloque PID 2 para que tome una acción de control y determine qué acción ejercer sobre el actuador 2, como indica la (Figura 76).



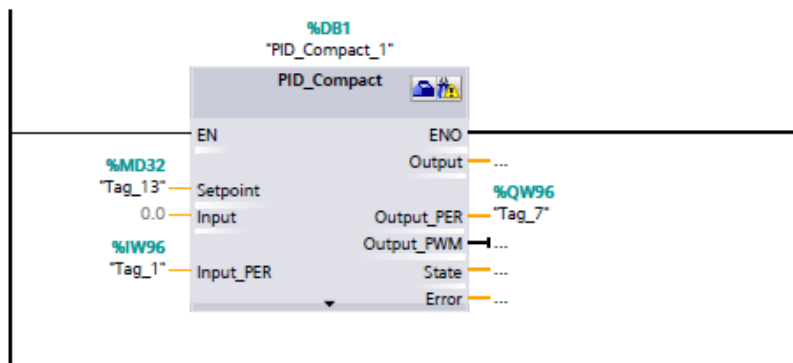
**Figura 76.** Diagrama de bloques del control en relación

En la implementación del controlador en relación (Figura 77), existen dos variables a controlar una que viene del transmisor de flujo A y otra del transmisor de flujo B, la señal proveniente del transmisor de flujo A que entra por %IW96 es multiplicada por un factor de relación, para que su resultado se convierta en la referencia a seguir en el lazo del flujo B.



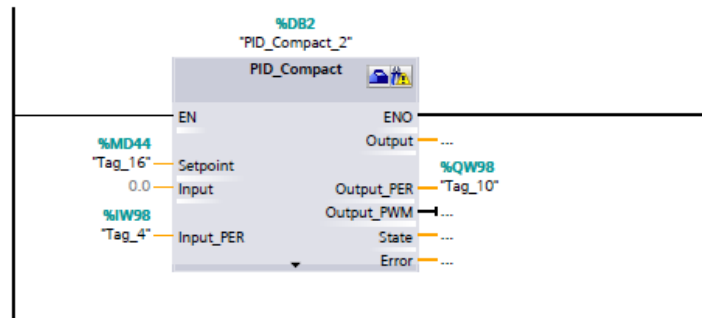
**Figura 77.** Normalización y escalamiento de las señales para el control en relación.

El bloque PID de la (Figura 78), es el encargado de controlar que el flujo A se mantenga siempre en la referencia deseada.



**Figura 78.** Bloque PID del flujo A.

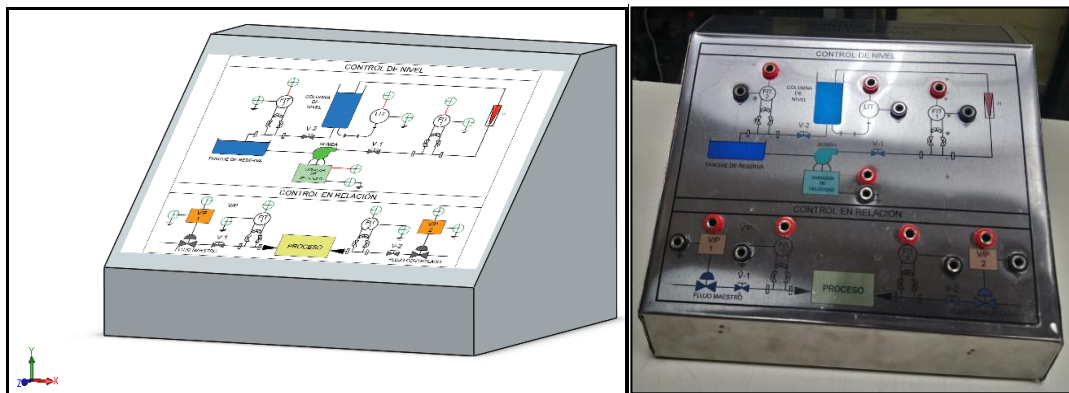
En cambio para controlar el flujo B, el bloque PID de este lazo que se indica en la (Figura 79), va a estar sujeto a que su referencia cambie continuamente debido a que esta proviene de la multiplicación del factor de relación y la señal medida del transmisor de flujo A.



**Figura 79.** Bloque PID del flujo B

### 3.9 Diseño y elaboración del módulo didáctico

El diseño de la estructura del módulo didáctico permite una fácil conexión entre las tarjetas de adquisición de datos y el PLC, fue desarrollado en el software Solidworks como se muestra en la Figura 80 sección (a) y la implementación del módulo se muestra en la sección (b)



(a)

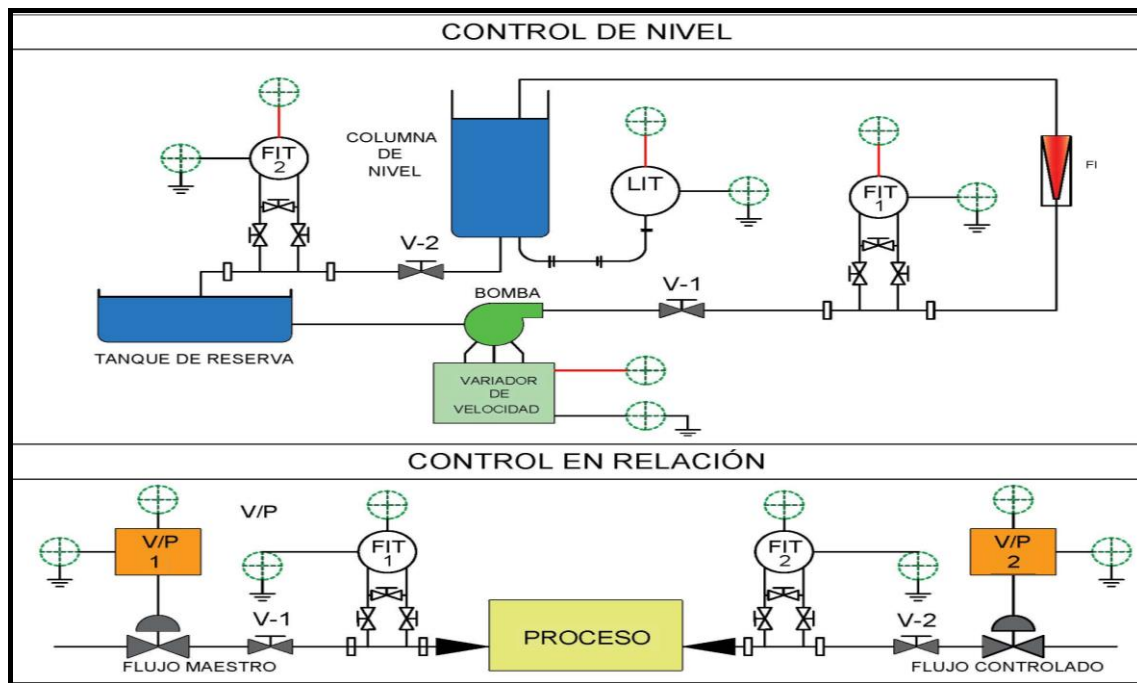
(b)

**Figura 80.** Módulo didáctico (a) Diseño, (b) Implementación

#### 3.9.1 Diagramas del panel frontal

En la (Figura 81), se muestra el panel frontal del módulo didáctico en el cual se encuentran los diagramas de las estaciones de proceso implementadas con terminales para su respectiva conexión.

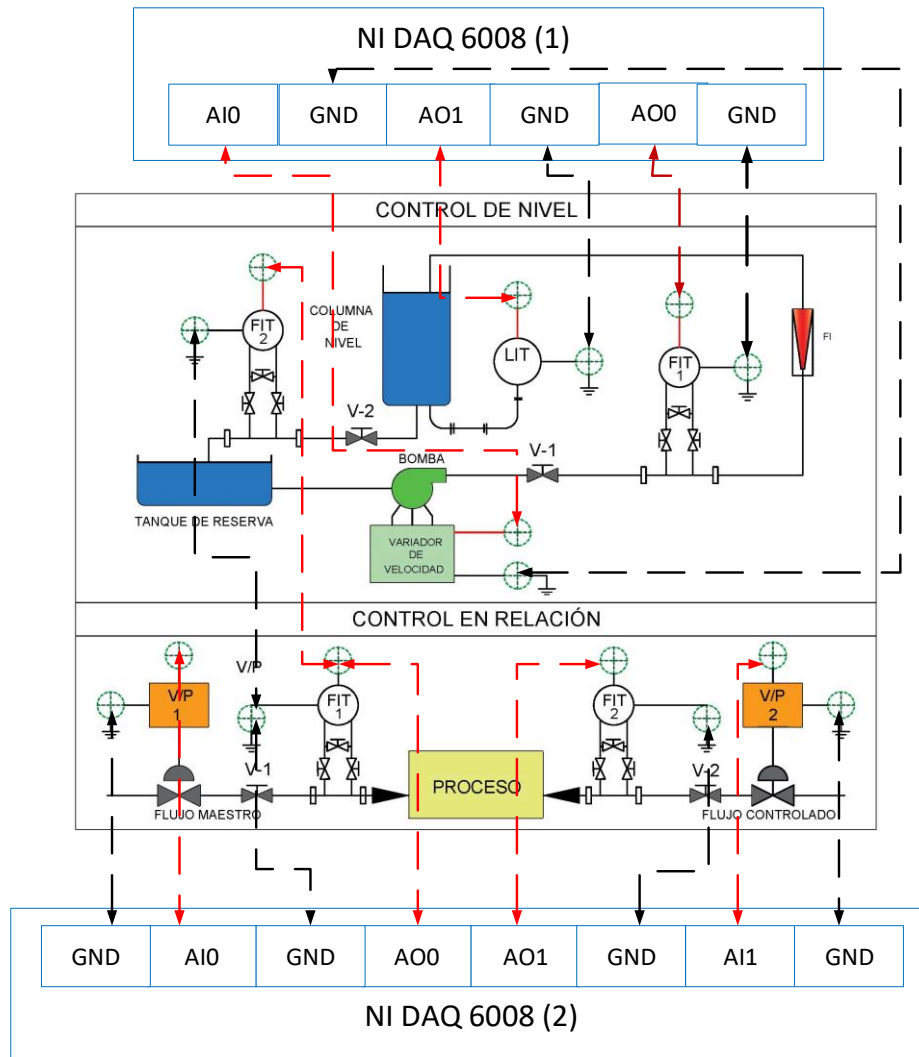




**Figura 81.** Diagramas del panel frontal

### 3.9.2 Conexión interna del módulo didáctico

En la (Figura 82) se describe la conexión interna entre el panel frontal y dos tarjetas NI DAQ 6008, donde las salidas analógicas (AO) generan las señales eléctricas de los transmisores y las entradas analógicas (AI) son los actuadores que reciben las señales eléctricas generadas por el controlador. Ambas tarjetas mediante conexión USB se conectan al computador donde se simula el proceso industrial.



**Figura 82.** Conexión interna entre DAQ y el módulo didáctico

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta las pruebas y los resultados del sistema didáctico, así como también las gráficas del comportamiento de los controladores PID, cascada y adelanto implementados para la regulación de la variable nivel y la respuesta del control en relación en la regulación del flujo maestro y controlado mediante una razón de control.

#### 4.1 Respuesta de transmisores y actuadores

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, se realizó la medición y generación de señales eléctricas de actuadores y transmisores para conocer el error que presentan, donde los resultados se detallan a continuación:

En la Tabla 6 se muestra la respuesta y el error de salida de voltaje del transmisor de caudal.

**Tabla 6**  
*Medición del transmisor de caudal*

Nº de mediciones	Sensor de caudal HIL (GPM)	Voltaje de salida (v) medido.	Voltaje de salida (v) calculado.	%Error
0	0.000	0.006	0.000	0.006
1	1.000	0.503	0.500	0.003
2	2.000	1.000	1.000	0
3	3.000	1.500	1.500	0
4	4.000	1.996	2.000	0.004
5	5.000	2.500	2.500	0
6	6.000	3.000	3.000	0
7	7.000	3.500	3.500	0
8	8.000	4.000	4.000	0
9	9.000	4.500	4.500	0
10	10.000	5.000	5.000	0
			%Error Total	0.000454545

En la Tabla 7 se muestra la respuesta y el error del variador de velocidad ante un voltaje de entrada.

**Tabla 7**  
*Respuesta del variador de velocidad*

Nº de pruebas	Ingresar voltaje (0-10v)	% de valor del variador de velocidad (HIL) medido.	% de valor del variador de velocidad (HIL) calculado.	%Error
0	0.000	0	0	0
1	1.000	9.997	10	0.003
2	2.000	19.995	20	0.005
3	3.000	29.992	30	0.008
4	4.000	39.992	40	0.008
5	5.000	49.993	50	0.007
6	6.000	59.996	60	0.004
7	7.000	69.994	70	0.006
8	8.000	79.992	80	0.008
9	9.000	89.991	90	0.009
10	10.000	99.999	100	0.001
			%Error Total	0.005363636

En la Tabla 8 se muestra la respuesta y el error de salida de voltaje del transmisor de nivel.

**Tabla 8**  
*Medición del transmisor de nivel*

Nº de mediciones	Sensor de nivel HIL (in)	Voltaje de salida (v) medido.	Voltaje de salida (v) calculado.	%Error
0	0	0	0.000	0
1	2.500	0.498	0.500	0.002
2	5.000	1.000	1.000	0
3	7.500	1.499	1.500	0.001
4	10.000	1.992	2.000	0.008
5	12.500	2.500	2.500	0
6	15.000	2.996	3.000	0.004
7	17.500	3.499	3.500	0.001
8	20.000	4.000	4.000	0
9	22.500	4.496	4.500	0.004
10	25.000	4.999	5.000	0.001
			%Error Total	0.001909091

En la Tabla 9 se muestra la respuesta y el error de salida de voltaje del transmisor de nivel.

**Tabla 9**

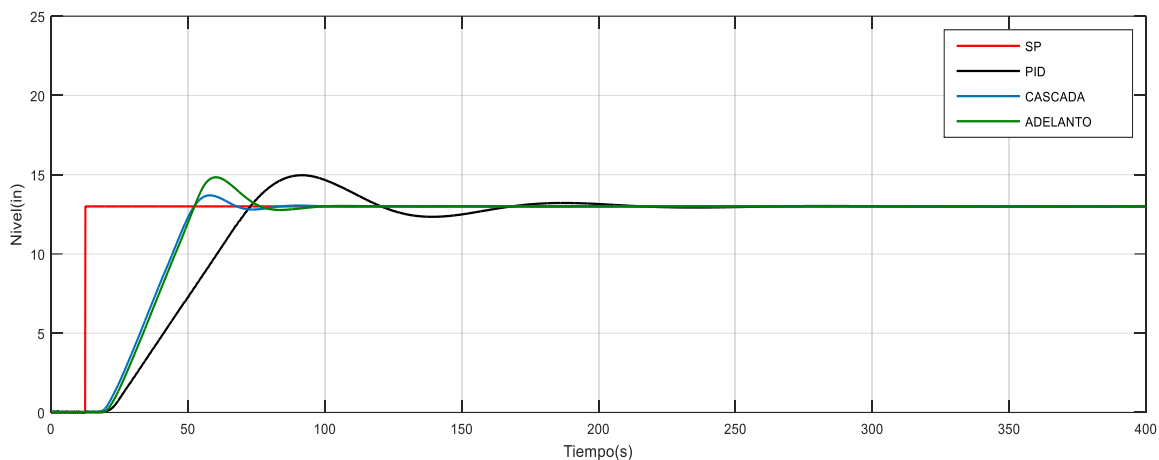
*Respuesta de la válvula proporcional*

Nº de pruebas	Ingresar voltaje (0-10v)	% de valor del variador de velocidad (HIL) medido.	% de valor del variador de velocidad (HIL) calculado.	%Error
0	0.000	0	0	0.000
1	1.000	9.997	10	0.003
2	2.000	19.994	20	0.006
3	3.000	29.993	30	0.007
4	4.000	39.993	40	0.007
5	5.000	49.996	50	0.004
6	6.000	59.998	60	0.002
7	7.000	69.996	70	0.004
8	8.000	79.999	80	0.001
9	9.000	89.992	90	0.008
10	10.000	99.999	100	0.001
%Error Total				0.003909091

Al finalizar el análisis del error que indica la simulación de los transmisores actuadores se presenta un porcentaje promedio de error de 0.0029%.

#### 4.2 Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel

Una vez implementados los controladores PID, cascada y adelanto en el simulador su respectiva simulación de la estación de proceso de nivel se obtiene las señales la respuesta de los controladores a un determinado punto de ajuste (Figura 83).



**Figura 83.** Respuesta de los controles PID, cascada y adelanto

Para validar los controles avanzados aplicados al proceso nivel realizamos comparaciones entre el punto de ajuste (SP) y la variable del proceso (PV), para cada control, donde se analiza los máximos sobreimpulsos y tiempos de establecimiento de cada uno de ellos, como muestra la Tabla 10.

**Tabla 10**

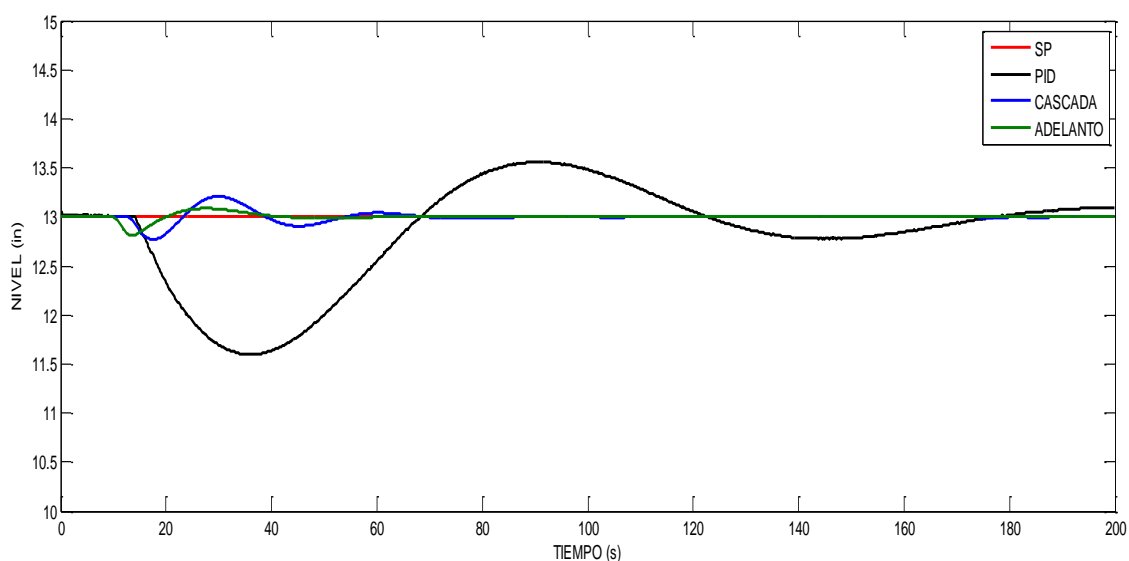
*Comparación de las estrategias de control para la variable nivel*

<b>Control</b>	<b>OS (%)</b>	<b>Tiempo de establecimiento (s)</b>
<b>PID</b>	7.876	146.2
<b>Cascada</b>	2.76	55.9
<b>Adelanto</b>	7.37	63.8

Se puede observar en la Tabla 10 que el control en cascada muestra un pequeño sobreimpulso y una buena velocidad de respuesta ante la respuesta del control PID y adelanto, con lo que se confirma que los parámetros de sintonía cumplen con lo esperado en la respuesta del sistema.

### 4.3 Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel ante perturbaciones.

Para obtener la respuesta de los controladores ante una perturbación, se realizó la simulación de la estación de nivel aplicando una carga del 25% de cierre en la válvula 1, en la (Figura 84) se puede apreciar el sobreimpulso generado por el cambio de flujo y la rápida acción que tienen los controles avanzados para seguir la referencia en menor tiempo, evitando cambios bruscos en el nivel del tanque.



**Figura 84.** Señales de los lazos de control de la variable nivel ante la perturbación de la V1

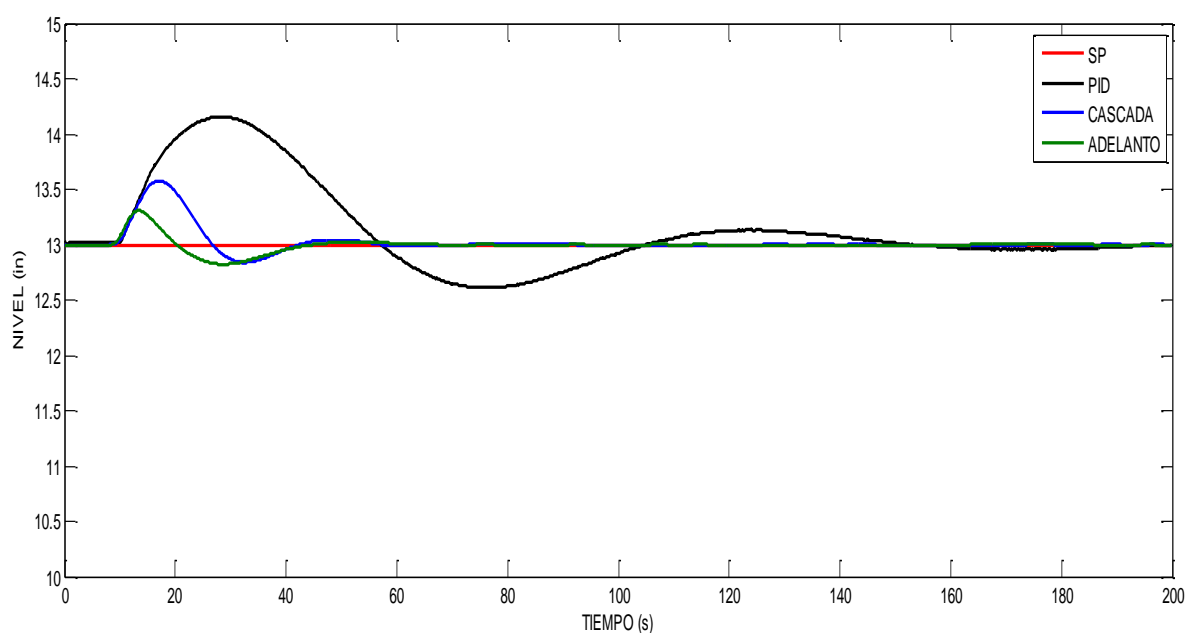
La comparación de las respuestas ante una perturbación se indica en la Tabla 11. Donde se considera como mejor controlador para la variable nivel, al que tiene un menor sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento, a partir de esos parámetros, se concluye que el mejor control es el denominado Adelanto, debido a la influencia de sus tres elementos, que miden flujo de entrada, flujo de salida y nivel del tanque.

**Tabla 11**

*Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-1 en el proceso nivel*

Control	OS (%)	Tiempo de establecimiento (s)
PID	2.232	185.8
Cascada	0.836	40.7
Adelanto	0.344	30.1

En la (Figura 85), se indica como es afectada la variable del proceso nivel aplicando una perturbación con la valvula 2, en donde se puede apreciar que el sobreimpulso fue mayor al que teníamos con la valvula 1, pero la velocidad de respuesta de los controladores avanzados permite seguir el punto de referencia en el menor tiempo posible, dando un error en estado estacionario casi nulo.



**Figura 85.** Señales de los lazos de control de la variable nivel ante la perturbación de la V-2



Al comparar estas estrategias de control en la Tabla 12, se puede destacar que el control en adelanto rechaza la perturbación más rápidamente que los demás controles, debido a que el lazo anticipativo del control en adelanto atenúa rápidamente ante la perturbación lo que lleva a tener mejores resultados, con sobreimpulsos y tiempos de establecimientos más cortos que los obtenidos con el control en cascada y el PID convencional.

**Tabla 12**

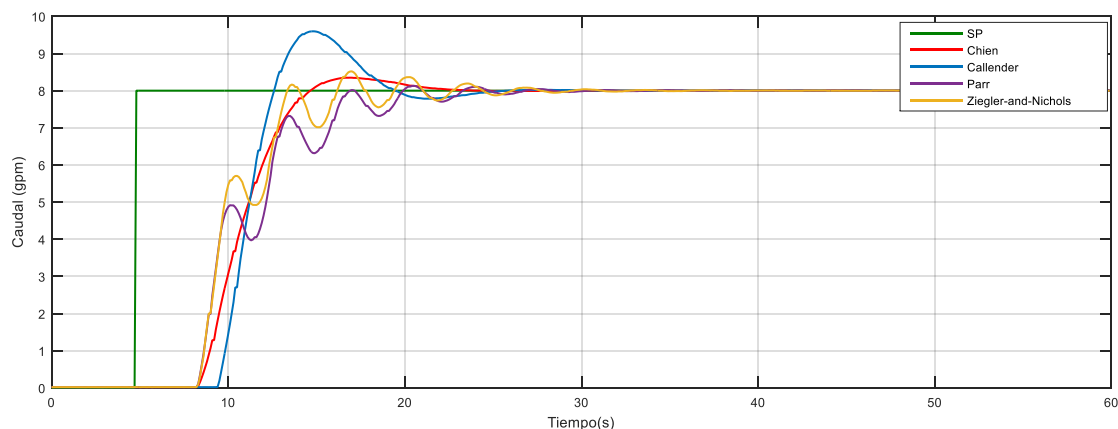
*Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-2 en el proceso nivel*

<b>Control</b>	<b>OS (%)</b>	<b>Tiempo de establecimiento (s)</b>
<b>PID</b>	4.628	141.1
<b>Cascada</b>	2.304	46.7
<b>Adelanto</b>	1.224	34.7

#### **4.4 Respuesta del control en relación para el sistema de control de flujos**

Para lograr el mejor desempeño del control en relación, es necesario sintonizar los lazos de control PID tanto del flujo maestro y flujo controlado, para ello es necesario determinar las constantes de sintonía mediante la comparación de los resultados de los métodos tales como: Chien, Callender, Parr y Ziegler-Nichols.

Aplicando los métodos de sintonía mencionados anteriormente se fijó una referencia en la cual se comparó las respuestas de cada controlador al momento de seguir la referencia, para definir que método de sintonía es el que mejor respondió se observó en la (Figura 86), el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento de cada uno de ellos se analiza en la Tabla 13, donde se considera al método de Chien como el mejor debido a que presenta un sobreimpulso muy pequeño y ninguna oscilación presente.



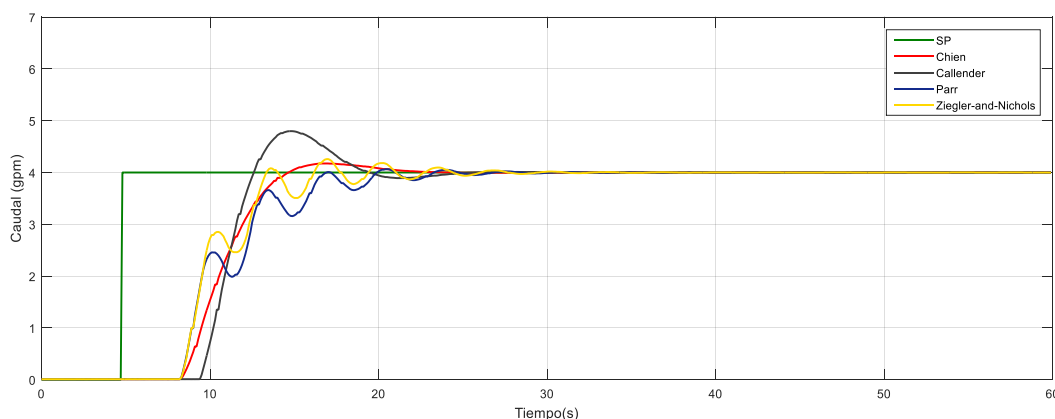
**Figura 86.** Métodos de sintonía aplicados al sistema de control de flujo maestro

**Tabla 13**  
Sintonía de controladores para el Flujo maestro

Control	$K_c$	$T_i$	$T_d$	OS (%)	Tiempo de establecimiento (s)
Chien	1.117	2.12	0.5695	2	12
Callender	0.9365	1.6151	0.4021	7	15
Parr	2.3266	2.8475	0.4556	1.5	12.9
Ziegler and Nichols	2.2335	2.278	0.5695	2	12.8

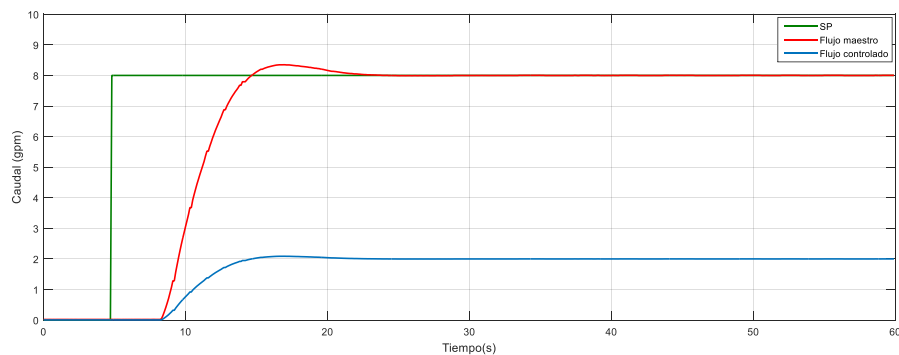
En la arquitectura del control en relación se requiere la señal del sensor del flujo maestro para realizar el control en el flujo controlado. Por lo tanto, la variable del flujo maestro y la variable del proceso de flujo controlado deben crecer y reducirse de forma lineal a medida que aumente o disminuya los flujos individuales.

En la (Figura 87) se repitió el proceso de comparación de los controladores con la diferencia que esta vez fue para la variable del flujo controlado, para corroborar que el método de Chien funciona correctamente y no presente ninguna anomalía, la referencia cambio debido a que en este método se usa una razón de proporción la cual puede ser modificada dependiendo los objetivos de la aplicación.



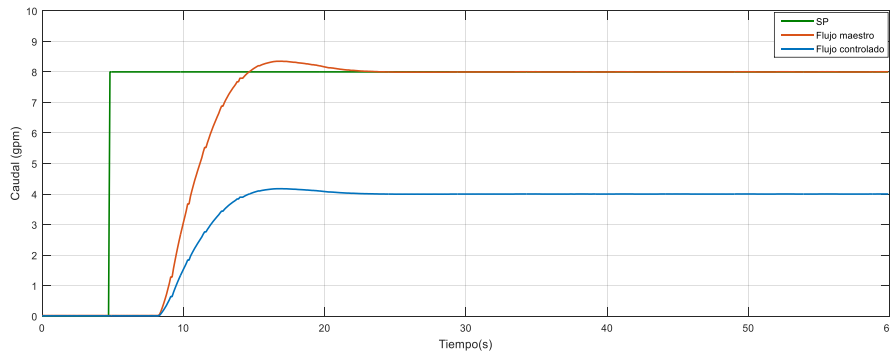
**Figura 87.** Métodos de sintonía aplicados al proceso de flujo controlado

Una vez sintonizado correctamente los controladores para los lazos de flujo maestro y controlado, se procedió a dar una referencia en el lazo maestro con una razón de proporción que es un parámetro ajustable en el panel de control y es accesible al cambio, se ajustó al 0.25, 0.5, 0.75 y 1, dando como resultado final un flujo constante de un flujo mixto con proporciones específicas entre el flujo maestro y controlado, como muestra la (Figura 88).

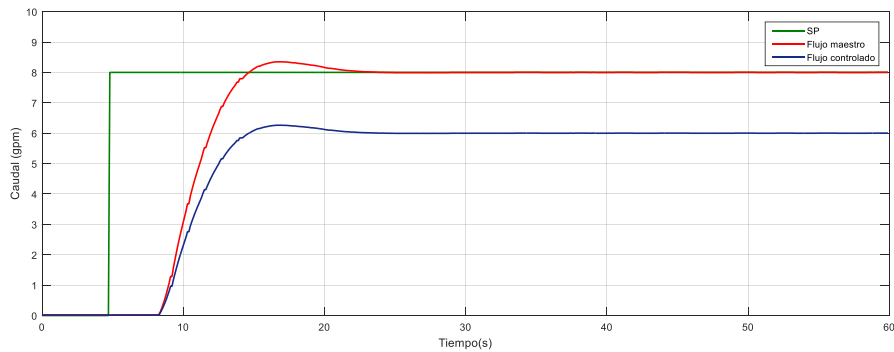


(a)

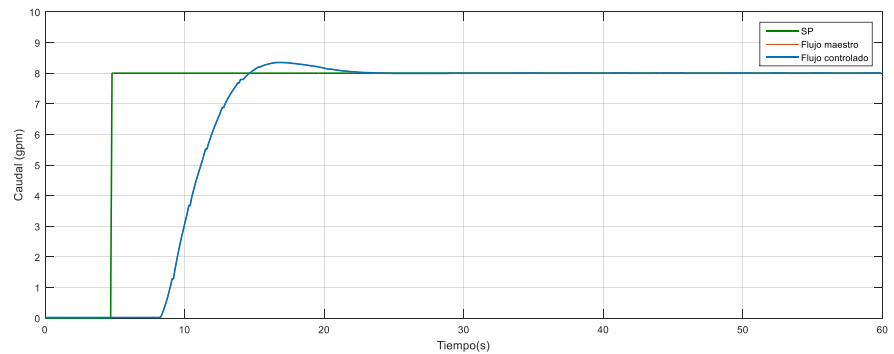
**CONTINÚA** 



(b)



(c)



(d)

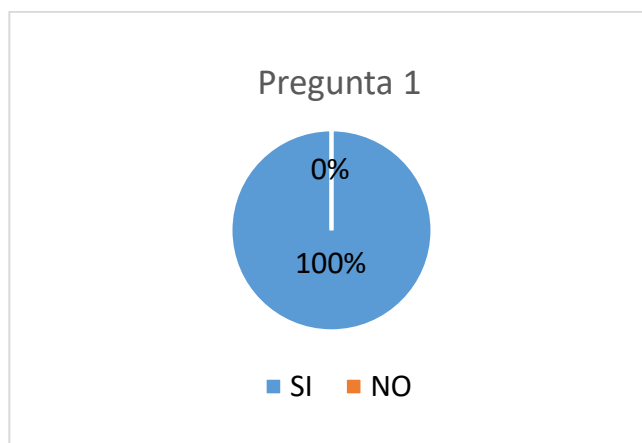
**Figura 88.** Flujo maestro y flujo controlado a diferentes razones de proporción: a) 0.25, b) 0.5, c) 0.75 y d) 1

#### 4.5 Comprobación de la hipótesis

Una vez desarrollada la implementación del sistema didáctico, la hipótesis fue comprobada con una encuesta a quince estudiantes de noveno nivel de ingeniería Electrónica e Instrumentación que desarrollaron las prácticas en el sistema didáctico, lo que permitió medir qué tan eficientes es el sistema como herramientas de enseñanza-

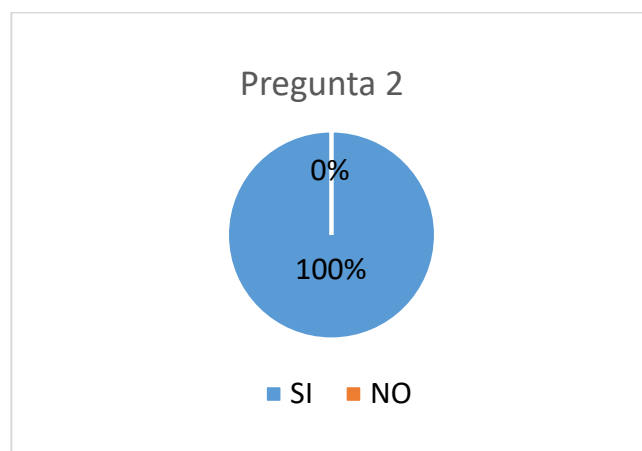
aprendizaje en control avanzado, los resultados indican un 100% de aceptación y se muestran en las Figuras 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95.

1. ¿El sistema didáctico es de fácil comprensión?



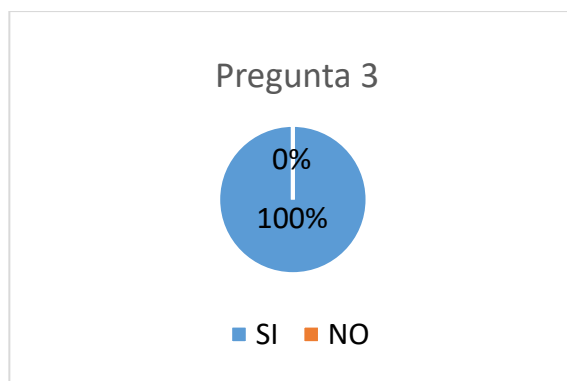
**Figura 89.** Resultados de la Pregunta 1

2. ¿La interfaz gráfica de las simulaciones de los procesos industriales es intuitiva y amigable?



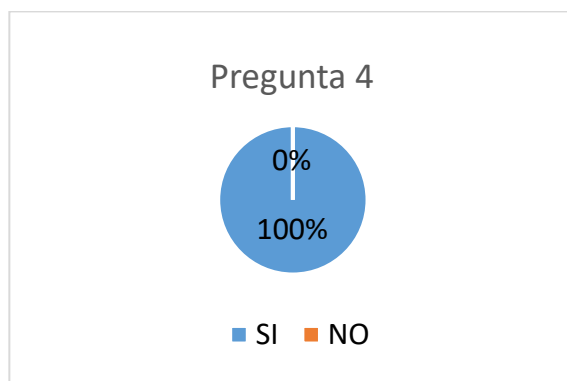
**Figura 90.** Resultados de la Pregunta 2

3. ¿Es capaz de conectar el PLC al módulo didáctico del simulador?



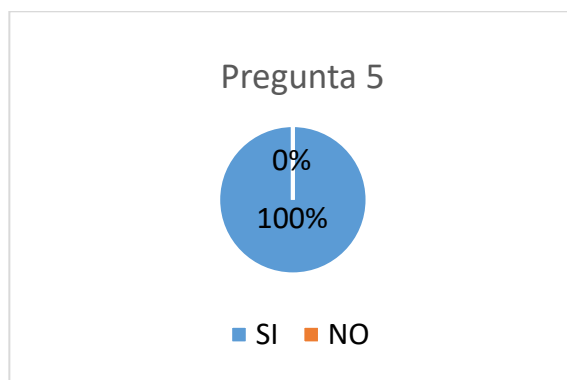
**Figura 91.** Resultados de la Pregunta 3

4. ¿Es capaz de implementar el control en cascada en el sistema didáctico?



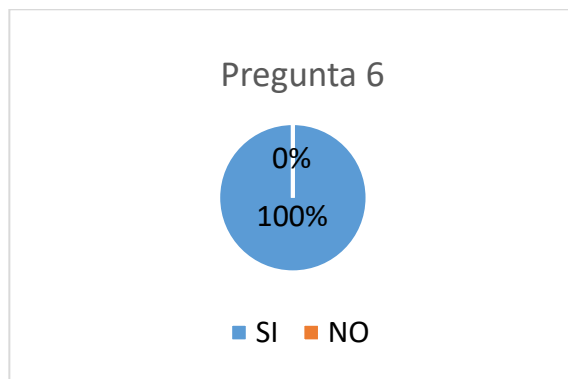
**Figura 92.** Resultados de la Pregunta 4

5. ¿Es capaz de implementar el control adelanto en el sistema didáctico?



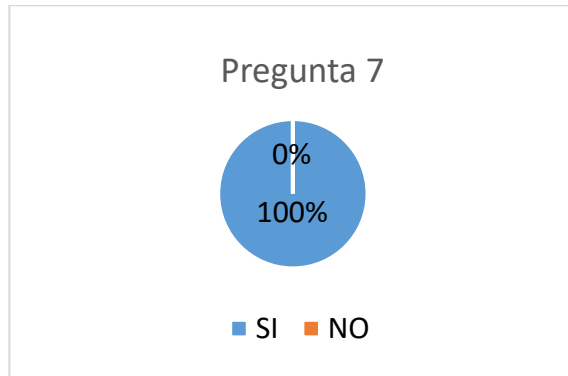
**Figura 93.** Resultados de la Pregunta 5

6. ¿Es capaz de implementar el control en relación en el sistema didáctico?



**Figura 94.** Resultados de la Pregunta 6

7. ¿El sistema didáctico le ayudo a adquirir nuevos conocimientos y experiencia sobre controles avanzados y multivariable?



**Figura 95.** Resultados de la Pregunta 7

#### 4.6 Alcances

- El sistema implementado permita la simulación de estaciones de procesos industriales bajo la técnica de Hardware-in-the-Loop y lo que permite la implementación y aprendizaje práctico de controles avanzados.

- El HMI del sistema didáctico permite la simulación de las estaciones de control de nivel y control de flujo en un entorno tridimensional, para así lograr un acercamiento claro al control de procesos industriales.
- Se implementó el control clásico PID y los controles avanzados cascada, adelanto y relación, evaluando el comportamiento de cada una de las técnicas de control avanzado ante condiciones cambiantes del proceso.

#### **4.7 Limitaciones**

- El sistema requiere el uso de dos tarjetas de adquisición de datos para la simulación de la estación de nivel método en adelanto, ya que este método requiere la generación de tres elementos de medida y cada una de estas tarjetas solo dispone de dos salidas analógicas cada una.
- El sistema no permite la conexión de lazo de corriente ya que para su funcionamiento genera señales de voltaje para los transmisores y recibe señales de voltaje del controlador.



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó un sistema didáctico en base a la características físicas de los elementos que componen la planta de proceso industrial del laboratorio, logrando así simular su comportamiento el cual presenta una gran exactitud y precisión, ya que en la medición y generación de señales presento un error menor al 1%, así como también funcionamientos en tiempo real y con gran similitud a un proceso industrial.
- Se desarrollaron las estrategias de control PID, cascada, adelanto y relación, partiendo del modelamiento analítico y experimental y la simulación de la planta en Labview, estas estrategias fueron implementadas en el entorno virtual a través de la técnica Hardware-in-the-loop que fue utilizada como herramienta para prueba de controladores, teniendo resultados muy próximos a los que se encuentran en una planta real, por lo tanto su uso es efectivo para el diseño e implementación de controladores .
- Se obtuvieron los modelos matemáticos para los procesos autorregulados e integrantes, con un 98% de similitud a las plantas LabVolt lo que permitió tener un control y supervisión de las variables en tiempo real para la implementación de controladores avanzados.
- El entorno inversivo de las estaciones de proceso se desarrolló en la plataforma de LabVIEW usando librerías para manejo de imágenes planas y objetos tridimensionales, logrando un ambiente totalmente realista y amigable con el usuario, lo cual permite el mejor manejo y entendimiento del proceso simulado.

- Se desarrolló algoritmos de control automático con diferentes modos, los cuales presentan gran estabilidad en el control así como una buena interacción con el Hardware-in-the-loop implementado.
- El sistema didáctico implementado ayudará a complementar de manera práctica los conocimientos adquiridos sobre control avanzado y multivariable, logrando una total aceptación por parte de los usuarios del sistema, según los resultados de la encuesta descrita anteriormente.

## 5.2 Recomendaciones

- Para el desarrollo en sistemas donde se necesita controlar varias entradas y salidas es necesario el uso de más tarjetas de adquisición de datos y un controlador con mayores prestaciones para que pueda manejar todas las señales a monitorear y controlar.
- Uno de los objetivos de la técnica HIL es reducir los costos, lo que se propone para trabajos futuros es el desarrollo de controladores digitales lo cual sería un gran aporte a este trabajo.
- Para la implementación de las técnicas de control automático en los procesos simulados se debe conocer los requerimientos propios del proceso, es decir, los elementos, características y su funcionamiento.
- Para lograr la animación de objetos tridimensionales en LabVIEW es necesario manejar cada parte del dibujo de la estación tridimensional en un objeto 3D independiente para luego juntar todos los objetos en una escena 3D animada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acedo, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos (Teoría y práctica)*. Madrid: Díaz de Santos.
- Aghili, F., & Piedboeuf, J. (2000). Hardware-in-loop simulation of robots interacting with environment via algebraic differential equation. *IEEE*.
- Aldemar, J. (2014). *Control automático I: estrategias de control clásico*. Ibagué: Universidad de Tolima.
- Blevins, T. (15 de 04 de 2013). *modelingandcontrol*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de On-Demand Tuning: <http://modelingandcontrol.com/2013/04/on-demand-tuning/>
- Cantot, P., & Luzeaux, D. (25 de 08 de 2016). *Ebook Central*. Recuperado el 21 de 05 de 2018, de Simulation and Modeling of Systems of Systems: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/espeec/detail.action?docID=1143608>.
- Club Saber Electrónica. (2012). *Autómatas Programables PLC*. México, D.F.: Quark.
- Controllab. (2015). *HIL simulation*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de Introduction to Hardware-in-the-Loop Simulation: <http://www.hil-simulation.com/images/stories/Documents/Introduction%20to%20Hardware-in-the-Loop%20Simulation.pdf>
- Creus, A. (2007). *Simulación y control de procesos por ordenador*. México, D.F.: Marcombo.
- DUMAN, E., CAN, H., & AKIN, E. (2014). FPGA Based Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation. *IEEE*, 616-621.
- Halvorsen, P. (17 de 01 de 2012). *University College of Southeast Norway*. Recuperado el 09 de 11 de 2018, de USN: <https://home.usn.no/hansha/documents/lab/Lab%20Work/HIL%20Simulation/Background/Introduction%20to%20HIL%20Simulation.pdf>
- King, M. (2016). *Process Control*. United Kingdom: WILEY.
- Lajara, J. (2007). *LabVIEW. Entorno gráfico de programación*. México, D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.
- National Instrumens. (21 de 11 de 2012). *Connect LabVIEW to Any PLC Using OPC*. Recuperado el 25 de 05 de 2018, de NI: <http://www.ni.com/tutorial/7450/en/>

- National Instruments. (25 de 03 de 2016). *DAQ*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de DAQ: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/daq/>
- National Instruments. (5 de 01 de 2018). *Labview*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de ni: <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview/labview-details.html>
- O'Dwyer, A. (2009). *HANDBOOK OF PI AND PID CONTROLLER TUNING RULES*. Singapore: B&JO Enterprise.
- Peacock, F. (2017). *The PID Tuning Blueprint*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de The ONE thing that separates the men from the PID tuning boys.: <https://www.pidtuning.net/article1-PID-Types.php>
- researchgate. (01 de 2013). *researchgate*. Recuperado el 25 de 08 de 2018, de MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO SERVOMECANISMOS: [https://www.researchgate.net/publication/260058488\\_METODOS\\_DE\\_SINTONIZACION\\_DE\\_CONTROLADORES\\_PID\\_QUE\\_OPERAN\\_COMO\\_SERVOMECANISMOS](https://www.researchgate.net/publication/260058488_METODOS_DE_SINTONIZACION_DE_CONTROLADORES_PID_QUE_OPERAN_COMO_SERVOMECANISMOS)
- SIEMENS. (2003). *SIMATIC Standar PID Control*. Alemania: Siemens .
- SIEMENS. (2015). *S7 Controlador Programable S7-1200*. Alemania: Siemens AG.
- Zaev, E., Tuneski, A., & Babunski, D. (2012). Hydro power plant governor testing using hardware-in-the-loop simulation. *IEEE*.

# ANEXOS



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

### CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Andrés Israel Cárdenas Quintana e Icler Paul Jiménez León

En la ciudad de Latacunga, a los 19 días del mes de noviembre del 2018.

Aprobado por:



Ing. Edwin Pruna  
DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Amparo Meythaler  
DIRECTORA DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca  
SECRETARIO ACADÉMICO