



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**CARRERA INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.**

Propuesta tecnológica presentada previo a la obtención del Título de  
INGENIEROS EN ELECTROMECANICA

**Autores:**

Caillagua Cuyo Erick Javier

Herrera Bravo Cristian Daniel

**Tutor Tesis:**

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes

Marzo 2021

**LATACUNGA – ECUADOR**



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Caillagua Cuyo Erick Javier y Herrera Bravo Cristian Daniel declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: “DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, siendo el Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo 2021

Caillagua Cuyo Erick Javier

C.I. 1724526411

Cristian Daniel Herrera Bravo

C.I. 1718115429

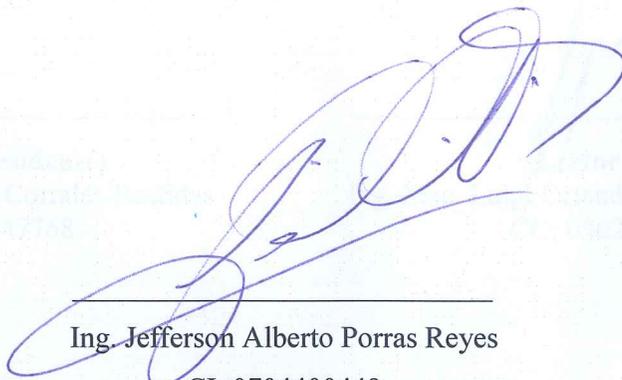


## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de los ponentes: Caillagua Cuyo Erick Javier y Herrera Bravo Cristian Daniel, de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, considero que la propuesta tecnológica cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación del Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2021



---

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes

CI: 0704400449



## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban de la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Caillagua Cuyo Erick Javier y Herrera Bravo Cristian Daniel con el título de Proyecto de titulación.

“DISEÑO DE UN SISTEMA DIDACTICO PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, marzo 2021

Para constancia firman:

**Lector 1 (Presidente)**

Ing. MSc. Byron Paúl Corrales Bastidas  
CC: 0502347768

**Lector 2**

Ing. Msc. Luigi Orlando Freire Martínez  
CC: 0502529589

**Lector 3**

Ing. Verónica Paulina Freire Andrade  
CC: 050205622

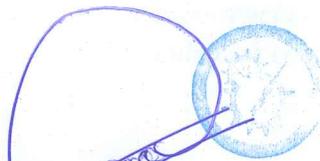


## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de director de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi certifico que mediante el proyecto de propuesta tecnológica: “DISEÑO DE UN SISTEMA DIDACTICO PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, los estudiantes; Caillagua Cuyo Erick Javier y Herrera Bravo Cristian Daniel realizan la entrega del sistema didáctico virtual de control de flujo para el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Carrera de ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

De acuerdo a lo anterior se hace constar que el proyecto de propuesta tecnológica se encuentra en las condiciones adecuadas.

Latacunga, marzo 2021



Ingeniería  
Electromecánica

**DIRECTOR DE LA CARRERA**  
Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez  
C.C. 050311373-0



## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por guiarme por el buen camino y haberme permitido alcanzar mis metas, con esfuerzo, y perseverancia, por permitirme tener y disfrutar junto a mi familia a la que más amo con todo el corazón, gracias a mi familia y hermanas por brindarme su cariño y apoyo en cada decisión importante en mi vida, a mi inspiración América, por ser el pilar fundamental y por ser padre y madre, que con su apoyo y esfuerzo incondicional hizo que sea posible cumplir mis sueños.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi por permitir formarme y obtener conocimientos, experiencias y darme la oportunidad de culminar mis estudios superiores, y además por ser un integrante más de la familia de la carrera de Ingeniería Electromecánica en toda mi vida universitaria.*

*A mi amigo y compañero tesista Erick, por su amistad y el apoyo académico a lo largo de la carrera universitaria, a mis amigos y demás familiares quienes a través de sus consejos y ánimos motivaron el deseo de cumplir mis metas y objetivos dentro de la universidad. Al Ing. Tutor Jefferson Porras, por tener paciencia en la realización del proyecto y además brindarnos su experiencia, y conocimientos que permitió culminar con éxito este trabajo.*

*Cristian Herrera*



## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo de titulación primero a Dios por fortalecer mi corazón día a día e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte fundamental y compañía durante todo este periodo de tiempo de estudio, a mi padre que estando en la gloria del señor, sé que es lo que más quería en este mundo.*

*A mi madre por todo su amor, trabajo, sacrificio en todos estos años y por el apoyo brindado a lo largo de todos mis estudios, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.*

*A mis hermanas Fernanda y Eliana, por su apoyo, confianza, y cariño incondicional durante todo este proceso de esfuerzo, el cual hicieron de mí una mejor persona.*

*A mis amigos por extenderme su mano cuando más lo necesito, con sus palabras de apoyo y motivación para lograr mis objetivos académicos, ya que ellos me apoyaron en las buenas y malas.*

*Cristian Herrera*



## AGRADECIMIENTO

*Primero agradecer a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, una meta más alcanzada la cual no hubiese sido posible sin la guía y enseñanza de mis padres María Isabel Cuyo y Pedro Pablo Caillagua a los que amo demasiado y agradezco de todo corazón por darme más de lo necesario para verme formado profesionalmente, de igual manera a mi hermana Nelly Caillagua por estar en todo momento durante mi carrera universitaria, guiarme y aconsejarme para seguir adelante como un buen profesional y por ultimo a mi familia que siempre me dieron un apoyo moral el cual nunca me hizo sentir solo.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas para adquirir conocimiento teórico y práctico que me ayudara en un futuro a desenvolverme en el campo laboral, vale recalcar que sin la ayuda y guía de los docentes esto no hubiese sido posible, también agradecer a mi tutor de Tesis Ing. Jefferson Porras el cual nos ayudó profesionalmente con conocimientos y apoyo moral para poder culminar el Tema de Titulación. A mi compañero tesista Cristian Herrera quien más que un compañero es un buen amigo el mismo que con esfuerzo y dedicación aportó con sus conocimientos para la culminación del proyecto.*

*Erick Caillagua*



## DEDICATORIA

*Este tema de Titulación va dedico a mi madre por estar en todos los momentos buenos y malos durante toda mi carrera Universitaria por darme siempre un apoyo económico, moral y brindarme todo su amor y comprensión para poder cumplir uno de mis sueños que es culminar mis estudios.*

*A mi padre que ha sido el pilar fundamental para poder progresar día a día el cual me dio un ejemplo a seguir y fue mi guía para no desviarme del camino del bien, también me supo enseñar que con esfuerzo y responsabilidad puedo cumplir todas mis metas y propósitos para llegar al éxito.*

*A mis hermanos y hermanas por brindarme su cariño, amor y los buenos deseos para poder seguir adelante con mis estudios y ser un gran ejemplo en la familia como ellos lo desean.*

*Erick Caillagua*

## INDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	i
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iii
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xviii
1. INFORMACIÓN BÁSICA .....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	3
2.1 Título de la propuesta tecnológica.....	3
2.2 Tipo de alcance.....	3
2.3 Área de conocimiento.....	3
2.4 Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	3
2.5 Objeto de estudio y campo de acción.....	4
2.5.1 Objeto de estudio.....	4
2.5.2 Campo de acción .....	4
2.6 Situación Problemática y Problema .....	4
2.6.1 Situación problemática.....	4
2.6.2 Problema.....	5
2.6.3 Matriz Causa-Efecto.....	5
2.7 Hipótesis o formulación de preguntas científicas.....	6
2.8 Objetivos .....	6
2.8.1 Objetivo general .....	6
2.8.2 Objetivos específicos.....	7
2.9 Descripción de las actividades con los objetivos establecidos .....	8
3. MARCO TEÓRICO.....	10

3.1	Introducción .....	10
3.2	Análisis de trabajos precedentes.....	10
3.3	Sistema didáctico.....	11
3.3.1	Fundamentos básicos sobre un módulo didáctico .....	12
3.4	Sistema de control .....	12
3.4.1	Términos básicos para analizar un sistema de control .....	13
3.4.2	Sistema de control en lazo abierto.....	14
3.4.3	Sistemas de control en lazo cerrado .....	15
3.5	Componentes del sistema didáctico .....	16
3.5.1	Flujo .....	16
3.6	Bomba de agua.....	18
3.7	Microcontrolador.....	18
3.7.1	Arduino nano.....	18
3.7.2	Señales analógicas y digitale.....	19
3.8	Controlado lógico programable (PLCs) .....	19
3.8.1	Funciones básicas de un PLC .....	20
3.8.2	Arquitectura del PLC .....	21
3.8.3	PLC siemens S7-1200 .....	21
3.9	Controlador PID .....	24
3.10	Métodos de sintonía de primer orden más tiempo muerto (FODT) .....	25
3.10.1	Método de sintonía Lambda.....	25
3.10.2	Método de sintonía de Cohen-Coon.....	27
3.10.3	Método de sintonía de Ziegler and Nichols.....	27
3.11	Método de sintonía para procesos integrantes más tiempo muerto (PID).....	28
3.11.1	Astrom y Hagglund (1995) .....	28
3.11.2	Ford (1953).....	28
3.11.3	Zou al (1997), Zou y Brigham (1998).....	28
3.12	Función de transferencia de sistemas de primer orden.....	28
3.13	Interfaz gráfica .....	29
3.13.1	Software para el control de procesos (Labview demo) .....	29
3.13.2	Matlab .....	30
3.14	Unity 3D.....	30
3.14.1	Características de Unity .....	31

3.14.2 Resultados en Unity .....	31
3.15 Realidad virtual en la educación .....	32
4. METODOLOGÍA.....	32
4.1 Generalidades.....	33
4.2 Normas para los instrumentos de medición de flujo.....	33
4.3 Descripción general del sistema de control .....	34
4.4 Dinámica del comportamiento de la planta .....	35
4.5 Identificación de la función de transferencia en Matlab .....	35
4.5.1 Modelo matemático.....	35
4.5.2 Función de transferencia .....	36
4.6 Implementación del entorno virtual .....	37
4.6.1 Estructura de la Planta Virtual .....	38
4.7 Diseño de componentes en CAD-3D.....	39
4.7.1 Diseño del rotámetro .....	39
4.7.2 Diseño del caudalímetro.....	40
4.7.3 Diseño de válvulas .....	40
4.7.4 Diseño de la Bomba .....	41
4.7.5 Diseño del Sensor de Nivel .....	41
4.7.6 Ensamblaje de la Planta Virtual de Flujo .....	42
4.8 Diseño del entorno virtual en Unity3D.....	43
4.8.1 Diseño de la placa del tablero de interconexión en Proteus.....	43
4.9 Tablero de interconexión entre el PLC y Unity3D .....	44
4.9.1 Diseño del HMI para el control de procesos .....	45
4.9.2 Interfaz de desarrollo.....	46
4.9.3 Modelo del algoritmo .....	48
4.10 Diagrama de bloques del sistema de control .....	49
4.11 Método de sintonía Lambda .....	49
4.12 Método de sintonía Cohen Coon .....	51
4.13 Método de sintonía de Ziegler and Nichols .....	56
4.14 Programación del PLC para el control de flujo .....	60
4.15 Comunicación serial entre Arduino y Unity3D .....	62
4.16 Interfaz entre el software de monitoreo HMI y Unity3D .....	62
4.16.1 Comunicación de aplicaciones de PC y módulos físicos .....	63

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	64
5.1 Validación del sistema de control de flujo.....	64
5.2 Función de Traslación.....	64
5.3 Control manual del sistema didáctico virtual .....	64
5.4 Control automático del sistema didáctico virtual .....	66
5.4.1 Sintonización del sistema con el método Ziegler-Nichols .....	67
5.4.2 Regulación del control PI.....	70
5.4.3 Descripción del sistema didáctico virtual.....	71
5.4.4 Diagrama PID del sistema.....	72
5.4.5 Simulación del proceso en realidad virtual .....	73
5.4.6 Medición y Comparación de variables de flujo entre el sistema real y el virtual (manual).....	74
5.4.7 Medición y Comparación de variables de flujo entre el sistema real y el virtual (automático).....	75
6. PRESUPUESTO.....	77
6.1 Costo de horas de ingeniería .....	77
6.1.1 Gastos directos totales .....	78
6.1.2 Gastos indirectos totales.....	78
6.2 Análisis de impactos .....	79
6.2.1 Impacto práctico.....	79
6.2.2 Impacto tecnológico .....	79
6.2.3 Beneficiarios.....	79
7. CONCLUSIONES.....	80
8. RECOMENDACIONES .....	81
9. BIBLIOGRAFÍA .....	82
10. ANEXOS .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Matriz Causa-Efecto .....	6
<b>Tabla 2.2.</b> Tareas por objetivos. ....	8
<b>Tabla 3.1.</b> Características de un sistema de control de lazo abierto. ....	14
<b>Tabla 3.2.</b> Tipos de sensores de flujo. ....	17
<b>Tabla 3.3.</b> Entradas y Salidas del Microcontrolador.....	19
<b>Tabla 3.4.</b> Funciones PLC S7-1200.....	22
<b>Tabla 3.5.</b> Características del PLC SIEMENS S7-1200, CPU 1212C .....	24
<b>Tabla 4.1.</b> Normativas. ....	33
<b>Tabla 4.2.</b> Tabla del método Lambda. ....	49
<b>Tabla 4.3.</b> Tabla de Cohen-Coon.....	52
<b>Tabla 4.4.</b> Tabla de fórmulas para Ziegler-Nichols.....	56
<b>Tabla 5.1.</b> Constantes del controlador PI.....	67
<b>Tabla 5.2.</b> Constantes del controlador PI.....	68
<b>Tabla 5.3.</b> Constantes del controlador PID.....	69
<b>Tabla 5.4.</b> Constantes reguladas del controlador PI. ....	70
<b>Tabla 5.5.</b> Datos de medición de flujo 1.....	74
<b>Tabla 5.7.</b> Datos de medición de flujo 2.....	76
<b>Tabla 6.1.</b> Costo de materiales locales.....	77
<b>Tabla 6.2.</b> Costo de diseño de Ingeniería.....	78
<b>Tabla 6.3.</b> Gastos directos totales .....	78
<b>Tabla 6.4.</b> Gastos indirectos totales .....	78

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Términos básicos para un sistema de control.....	13
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama esquemático de un sistema de control de lazo abierto .....	14
<b>Figura 3.3.</b> Diagrama esquemático de un sistema de control de lazo cerrado.....	15
<b>Figura 3.4.</b> Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado.....	16
<b>Figura 3.5.</b> Sensor de Flujo .....	17
<b>Figura 3.6.</b> Bomba Periférica de 1 HP.....	18
<b>Figura 3.7.</b> Microcontrolador Arduino .....	19
<b>Figura 3.8.</b> Funciones específicas de un PLCs .....	20
<b>Figura 3.9.</b> Arquitectura del PLC .....	21
<b>Figura 3.10.</b> Características del PLC S7-1200 .....	21
<b>Figura 3.11.</b> Tamaño físico PLC S7-1200, CPU 1212C .....	23
<b>Figura 3.12.</b> Esquema básico de control PID. ....	25
<b>Figura 3.13.</b> Función de transferencia .....	29
<b>Figura 3.14.</b> Portada del programa LabVIEW. ....	30
<b>Figura 3.15.</b> Portada del MATLAB.....	30
<b>Figura 3.16.</b> Software 3D para modelos BIM en realidad aumentada. ....	31
<b>Figura 4.1.</b> Esquema general de funcionamiento. ....	34
<b>Figura 4.2.</b> Diagrama de la planta física.....	35
<b>Figura 4.3.</b> Comportamiento del flujo de la planta física. ....	36
<b>Figura 4.4.</b> Función de transferencia. ....	36
<b>Figura 4.5.</b> Respuesta al escalón del proceso. ....	37
<b>Figura 4.6.</b> Diseño de la estructura en el software de dibujo CAD 2D. ....	38
<b>Figura 4.7.</b> Diseño de la estructura en 3D. ....	39
<b>Figura 4.8.</b> Diseño del Rotámetro.....	40
<b>Figura 4.9.</b> Diseño del Caudalímetro.....	40
<b>Figura 4.10.</b> Diseño del Válvulas. ....	41
<b>Figura 4.11.</b> Diseño de la bomba.....	41
<b>Figura 4.12.</b> Diseño del sensor de nivel. ....	42
<b>Figura 4.13.</b> Ensamblaje de la planta virtual de flujo.....	42
<b>Figura 4.14.</b> Entorno virtual en Unity3D.....	43
<b>Figura 4.15.</b> Identificación de la placa en Proteus.....	44
<b>Figura 4.16.</b> Tablero de Interconexión. ....	44
<b>Figura 4.17.</b> Señal de Excitación y respuesta de la planta de Control Manual. ....	45
<b>Figura 4.18.</b> Señal de Excitación y respuesta de la planta de Control Automático.....	45
<b>Figura 4.19.</b> Dinámica del Sistema con Control Manual. ....	46
<b>Figura 4.20.</b> Dinámica del Sistema con un control automático.....	47
<b>Figura 4.21.</b> Bloques de indicadores principales.....	47
<b>Figura 4.22.</b> Estructura para guardar las variables. ....	48
<b>Figura 4.23.</b> Diagrama de flujo para el modelo del PID. ....	48
<b>Figura 4.24.</b> Diagrama de bloques del sistema de control.....	49
<b>Figura 4.25.</b> Método de Lambda con control PID.....	51

<b>Figura 4.26.</b> Método de Cohen-Coon con control P.....	53
<b>Figura 4.27.</b> Método de Cohen-Coon con control PI. ....	54
<b>Figura 4.28.</b> Método de Cohen-Coon con control PI. ....	56
<b>Figura 4.29.</b> Método de Ziegler-Nichols con control P.....	57
<b>Figura 4.30.</b> Método de Ziegler-Nichols con control PI. ....	58
<b>Figura 4.31.</b> Método de Ziegler-Nichols con control PID.....	60
<b>Figura 4.32.</b> Ladder de Control. ....	60
<b>Figura 4.33.</b> Ladder de Control. ....	61
<b>Figura 4.34.</b> Control PID Compact.....	62
<b>Figura 4.35.</b> Intercambio de datos entre módulos físicos y aplicaciones de PC. ....	63
<b>Figura 5.1.</b> Simulación en Lazo Abierto. ....	64
<b>Figura 5.2.</b> Control manual del sistema con la función de transferencia. ....	65
<b>Figura 5.3.</b> Comportamiento dinámico de la respuesta al control manual. ....	66
<b>Figura 5.4.</b> Simulación en lazo cerrado con retroalimentación unitaria.....	66
<b>Figura 5.5.</b> Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control P. ....	67
<b>Figura 5.6.</b> Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control PI.....	68
<b>Figura 5.7.</b> Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control PID.....	69
<b>Figura 5.8.</b> Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control PI (regulado). ....	71
<b>Figura 5.9.</b> Control automático del sistema.....	71
<b>Figura 5.10.</b> Planta virtual en Unity3D. ....	72
<b>Figura 5.11.</b> Diagrama PID del control de flujo.....	73
<b>Figura 5.12.</b> Simulación del proceso en un entorno virtual.....	74
<b>Figura 5.13.</b> Rango de error entre sistemas 1. ....	75
<b>Figura 5.15.</b> Rango de error entre sistemas 2. ....	76



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO:** “DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”

**Autores:** Caillagua Cuyo Erick Javier  
Herrera Bravo Cristian Daniel

### RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se diseñó un sistema didáctico de control de flujo a través de un entorno en realidad virtual para el aprendizaje de control de procesos en el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Y con respecto a la simulación del proceso virtual se obtuvo el modelo matemático de la planta real para obtener el comportamiento del proceso en tiempo real y mediante el software MATLAB se adquirió la función de transferencia la cual fue utilizada para incrementar el realismo del sistema didáctico virtual.

El entorno virtual fue diseñado en el software Unity3D el cual refleja la planta real existente del laboratorio, este emula el funcionamiento del sistema en tiempo real, además se desarrolló un HMI para el control y monitoreo de las variables de flujo, donde los datos fueron adquiridos desde el controlador lógico programable (PLC S7-1200) mediante una interfaz NI OPC\_Server, también se creó un bloque programado para una comunicación TCP/IP con Unity3D. De esta manera se realizó las prácticas de medición y comparación de variables de flujo a través de un entorno virtual para poder evaluarlas mediante la teoría de errores de medida en el área técnica de Instrumentación y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.

**Palabras claves:** interfaz, entorno virtual, software, automatización, función de transferencia, flujo, comunicación, medición, comparación.



## TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

### FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED

**THEME:** “DESIGN OF A DIDACTIC SYSTEM FOR THE CONTROL PROCESS LEARNING, CASE STUDY FLOW CONTROL FOR THE AUTOMATION AND CONTROL RESEARCH LABORATORY OF THE ELECTROMECHANICAL ENGINEERING CAREER, TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI”

**Autores:** Caillagua Cuyo Erick Javier  
Herrera Bravo Cristian Daniel

### ABSTRACT

In this degree project, a didactic flow control system was designed through a virtual reality environment for learning process control in the Automation and Control Research Laboratory of the Technical University of Cotopaxi. Regarding the simulation of the virtual process was obtained the mathematical model of the real plant to obtain the behavior of the process in real time and through the MATLAB software, the transfer function was acquired which was used to increase the realism of the virtual teaching system.

The virtual environment was designed in the Unity3D software which reflects the existing real plant of the laboratory, this emulates the operation of the system in real time, in addition an HMI was developed for the control and monitoring of the flow variables, where the data was acquired from the programmable logic controller (PLC S7-1200) through an NI OPC\_Server interface, a programmed block for communication TCP / IP with Unity3D was also created. In this way, the practices of measurement and comparison of flow variables were carried out through a virtual environment to be able to evaluate them through the theory of measurement errors in the technical area of Instrumentation and Control of the Electromechanical Engineering Career.

**Keywords:** interface, virtual environment, software, automation, transfer function, flow, communication, measurement, comparison.



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

## ***AVAL DE TRADUCCIÓN***

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los egresados de la Carrera de **INGENIERIA ELECTROMECHANICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS, CAILLAGUA CUYO ERICK JAVIER Y HERRERA BRAVO CRISTIAN DANIEL** cuyo título versa “**DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECHANICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimen conveniente.

Latacunga, marzo del 2021.

Atentamente,

**MSc. Diana Karina Taipe Vergara**  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS**  
**C.C. 1720080934**



CENTRO  
DE IDIOMAS

## 1. INFORMACIÓN BÁSICA

### **Propuesto por:**

Caillagua Cuyo Erick Javier

Herrera Bravo Cristian Daniel

### **Tema aprobado:**

“Diseño de un sistema didáctico para el aprendizaje del control de procesos, estudio de caso Control de Flujo para el laboratorio de investigación de automatización y control de la carrera de ingeniería electromecánica de la universidad técnica de Cotopaxi”.

### **Carrera:**

Ingeniería Electromecánica

### **Director del proyecto de titulación:**

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes

### **Equipo de trabajo:**

#### **Tutor**

Nombres: Jefferson Alberto  
Apellidos: Porras Reyes  
Cedula de identidad: 070440044-9  
Email: Jefferson.porras0449@utc.edu.ec

#### **Ponente 1**

Nombres: Erick Javier  
Apellidos: Caillagua Cuyo  
Cedula de identidad: 172452641-1  
Email: erick.caillagua6411@utc.edu.ec

## **Ponente 2**

Nombres: Cristian Daniel  
Apellidos: Herrera Bravo  
Cedula de identidad: 171811542-9  
Email: cristian.herrera5429@utc.edu.ec

### **Lugar de ejecución:**

Zona 3, Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia San Felipe.

### **Tiempo de duración del proyecto:**

6 meses.

### **Fecha de entrega:**

Marzo 2021

### **Línea(s) y sublíneas de investigación a las que se asocia el proyecto:**

Líneas de investigación: Procesos Industriales.

Tecnologías de la información y comunicación (TICS)

Sub líneas de investigación: Automatización, control, y protecciones de sistemas electromecánicos.

### **Tipo de propuesta tecnológica**

El tipo de propuesta tecnológica corresponde al diseño de un sistema didáctico virtual de control de flujo, de esta forma se obtendrá el modelo matemático del comportamiento de la planta real, y se utilizara un software de control y monitoreo del proceso que se reflejará en un entorno virtual utilizando Unity3D el cual permita realizar prácticas de medición y comparación de variables de flujo en realidad virtual, donde se adquirirá valores medidos y se verificará su comportamiento de precisión y exactitud, aplicando la teoría de errores de medición para el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## 2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

### 2.1 Título de la propuesta tecnológica

Diseño de un sistema didáctico para el aprendizaje del control de procesos, estudio de caso control de flujo para el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

### 2.2 Tipo de alcance

Con la implementación del sistema virtual los estudiantes pueden realizar prácticas de medición y comparación de variables de flujo durante el confinamiento, utilizando instrumentos tecnológicos similares a los implementados en las grandes industrias, y así complementar mayor conocimiento práctico. Además, los estudiantes fomentan un proceso creativo con el fin de adquirir experiencia proporcionada para poder realizar un trabajo en equipo, y de tal manera dar solución a problemas relacionados con la práctica pre profesional.

### 2.3 Área de conocimiento

07 Ingeniería, industria y construcción.

071 Ingeniería y profesiones afines.

### 2.4 Sinopsis de la propuesta tecnológica

Se plantea el diseño de un sistema didáctico virtual para el aprendizaje de control de flujo, su funcionamiento está basado en la medición y comparación de variables de flujo, utilizando Unity3D para la simulación del proceso en realidad virtual con un panel de operador o HMI para el monitoreo de sistema y mediante una comunicación serial con Arduino se obtendrá entradas y salidas analógicas que permite el intercambio de datos entre Unity3D y el PLC S7-1200 donde está desarrollado el control PID del proceso y así obtener la simulación del proceso en un escenario 3D en tiempo real.

El proyecto es diseñado con la finalidad de realizar prácticas virtuales de medición de flujo en el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## **2.5 Objeto de estudio y campo de acción**

### **2.5.1 Objeto de estudio**

Sistema didáctico virtual para el aprendizaje de medición de flujo en tiempo real en el área de control, del Laboratorio de Investigación de Automatización y Control.

### **2.5.2 Campo de acción**

UNESCO-3311 Tecnología de la Instrumentación.

3311.01 Tecnología de la Automatización.

3311.02 Ingeniería de control.

ISO-IEC-17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

ISO-25000 Calidad de Software y datos.

## **2.6 Situación Problemática y Problema**

### **2.6.1 Situación Problemática**

La crisis sanitaria a nivel mundial representa una amenaza para el avance de la educación, donde afectó considerablemente a los estudiantes y se vieron comprometidos a un nuevo escenario como es la educación online. Por esta razón no se puede realizar prácticas presenciales de forma regular en los laboratorios con los módulos físicos y esto limita al aprendizaje práctico de los estudiantes. Por el cual se propone realizar un sistema didáctico virtual que refleje el módulo físico del laboratorio, de esta manera se podrá realizar las prácticas correspondientes en una plataforma online.

En la actualidad, las industrias tienen varios procesos industriales, uno de ellos es el control de flujo de líquidos. Es por ello que en el ámbito de control de procesos industriales toma gran importancia el control de la magnitud de flujo. Un sistema de flujo es importante para

mantener el régimen de operación mediante la etapa de medición, ya que nos permite conocer valores o datos reales, mediante estos datos obtenidos se puede realizar lazos de control más estables, con la finalidad de ser analizados y comparados dentro de la industria. En procesos industriales las fuentes más aplicables es la utilización de fluidos, ya que están en distintos procesos de la industria. El control PID soluciona varios problemas en diferentes procesos industriales y es usado en la industria en un 95%, por ende, los sistemas de control automáticos, son de gran importancia para todas las industrias ya que sin ellos no se podrían mantener los diferentes procesos con eficiencia y calidad.

En los niveles de educación, el uso de control de líquidos aporta al estudio para el avance de los sistemas de control de flujo, además de otorgar una manera didáctica para realizar prácticas de laboratorio enfocadas a la solución de problemáticas a menor escala. Por el cual, se realizará un proyecto utilizando Unity3D para la simulación del proceso en realidad virtual con un sistema computarizado de control, que permita determinar desde una perspectiva de la ingeniería, el análisis de errores en las mediciones de variables de flujo, con el fin de aportar un mayor aprendizaje en el área profesional que incide en la Ingeniería Electromecánica.

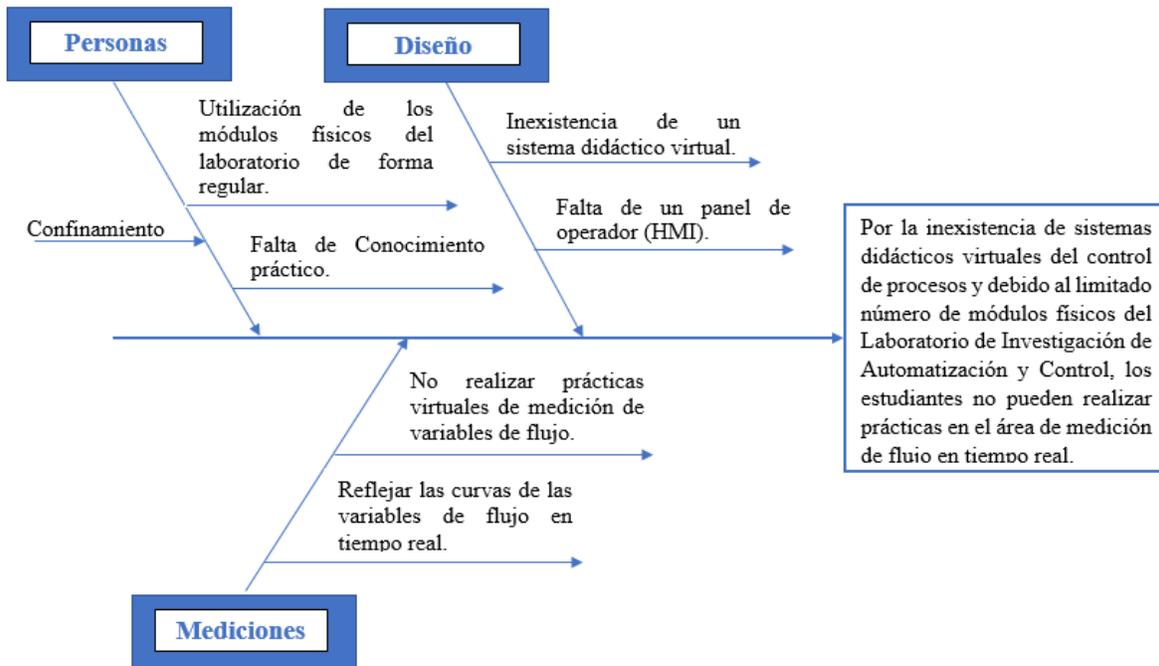
### **2.6.2 Problema**

Por la inexistencia de sistemas didácticos virtuales del control de procesos y debido al limitado número de módulos físicos del Laboratorio de Investigación de Automatización y Control, los estudiantes no pueden realizar prácticas en el área de medición de flujo en tiempo real.

### **2.6.3 Matriz Causa-Efecto**

En el diagrama de Ishikawa se describen las causas para llegar al problema y analizar de una manera más adecuada la problemática e identificar posibles soluciones del mismo.

**Tabla 2.1.** Matriz Causa-Efecto



## 2.7 Hipótesis o formulación de pregunta científica

El diseño de un módulo didáctico virtual de control de procesos, permitirá la realización de prácticas de medición de flujo utilizando la realidad virtual para poder evaluarlas mediante la teoría de errores de medida en el área técnica de instrumentación y control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## 2.8 Objetivos

### 2.8.1 Objetivo General

Diseño de un sistema didáctico virtual utilizando Unity3D para la simulación del control de proceso en realidad virtual, con el fin que los estudiantes puedan realizar prácticas de medición de flujo en tiempo real implementado en el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

### **2.8.2 Objetivos Específicos**

- Investigar en diferentes fuentes bibliográficas sobre el estudio de equipos y métodos para obtener el modelo matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso que son aplicados en la automatización de procesos industriales para el control de flujo.
- Diseñar un sistema virtual utilizando el software Unity3D que refleje el módulo físico existente en el laboratorio.
- Implementar un control al sistema virtual de flujo y un HMI para el monitoreo y la visualización de la variable relevante del proceso.
- Comprobar el funcionamiento y la validación de variables, obteniendo los parámetros del controlador para optimizar el proceso del sistema didáctico virtual.

## 2.9 Descripción de las actividades con los objetivos establecidos

Tabla 2.2. Tareas por objetivos.

OBJETIVOS	TAREAS	RESULTADO DE LA ACTIVIDAD	DESCIPCION DE LA ACTIVIDAD
Investigar en diferentes fuentes bibliográficas sobre el estudio de equipos y métodos para obtener el modelo matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso que son aplicados en la automatización de procesos industriales para el control de flujo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se obtiene información de fuentes bibliográficas relacionadas a los sistemas de control de flujo y automatización de procesos.</li> <li>➤ Se investiga cómo obtener el modelo matemático y la función de transferencia de la planta.</li> </ul>	Conocimiento teórico sobre el modelo matemático a utilizar y los diferentes procesos de control de flujo.	Investigación bibliográfica
Diseñar un sistema virtual utilizando el software Unity3D que refleje el módulo físico existente en el laboratorio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Modelaje de los componentes del sistema didáctico virtual en un software de diseño CAD 3D.</li> <li>➤ Ensamblaje del sistema didáctico en Unity3D.</li> </ul>	Simulación del proceso en tiempo real del sistema didáctico virtual.	Utilizar el sistema didáctico virtual para la simulación del funcionamiento del sistema de control de flujo.

<p>Implementar un control al sistema virtual de flujo y un HMI para el monitoreo y la visualización de la variable relevante del proceso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Realización de la programación para el sistema de control de flujo para la monitorización del sistema.</li> <li>➤ Se genera un análisis de los datos desarrollados dentro del proceso de control de flujo.</li> </ul>	<p>Interpretación de las curvas de flujo del comportamiento del sistema a través de la variable de operación.</p>	<p>Con el uso del software de programación se pudo interpretar las curvas de la variable de flujo.</p>
<p>Comprobar el funcionamiento y la validación de variables, obteniendo los parámetros del controlador para optimizar el proceso del sistema didáctico virtual.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Validación de los métodos de sintonización para el correcto funcionamiento del proceso.</li> <li>➤ Análisis de la interfaz entre el sistema virtual Unity3D y Software de control.</li> </ul>	<p>El sistema didáctico virtual cumple con los parámetros ideales de la variable del proceso.</p>	<p>Con el uso del sistema didáctico virtual se pudo realizar las mediciones de flujo en un entorno 3D en tiempo real.</p>

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Introducción

A continuación se presenta la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del proyecto donde se identificara los componentes del sistema didáctico virtual y los diferentes software utilizados mediante una indagación bibliográfica para obtener las variables necesarias del control del sistema y así poder realizar la medición y comparación de datos con los módulos existentes en el Laboratorio de Investigación de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

A través de los años la tecnología avanza de una manera considerable dedicada a la automatización donde son sistemas que siguen una secuencia previamente establecida, que ha dado lugar a avances significativos que le han permitido a las compañías implementar procesos de producción más eficientes, seguros y competitivos y así mismo al sistema educativo que se enfocan en el diseño de estos sistemas.

Siemens es un ejemplo, el cual se encarga por el desarrollo, fabricación diseño e instalación de productos, de igual manera para sistemas complejos y proyectos, además se encarga de crear amplias soluciones para enfrentar los desafíos más difíciles de los clientes [1].

#### 3.2 Análisis de trabajos precedentes

Se menciona algunos trabajos realizados para el uso de nuevas tecnologías y mejoras en los ámbitos de control de flujo.

“Hardware-in-the-Loop para el control de los procesos caudal” [2], concluye que la obtención del comportamiento dinámico de los sistemas de control de procesos está basada tanto en los tipos de los elementos que lo conforman y su funcionamiento, Su principal diferencia radica en el tipo y configuración del sistema, que determina el método de obtención de la función de transferencia.

“Diseño de un módulo didáctico para el control de flujo” [3], mediante el sistema de control del módulo admite la operación del sistema tanto en lazo cerrado como en lazo abierto, el

PLC ejecuta las acciones de control requeridas para gobernar a los variadores de velocidad y estos a la vez controlan la velocidad de los motores de las dos bombas.

“Diseño e implementación del sistema de control y monitoreo de nivel y flujo” [4], mediante un adecuado control y seguimiento de los diferentes procesos en plantas de tratamiento y estaciones de almacenamiento de agua potable, ayudando a integrar tres elementos principales, como la captura, el almacenamiento y la distribución, que ayudaron a optimizar el uso del agua y ahorrar electricidad.

“Fundamentos básicos de instrumentación y control” [5], mediante la optimización de procesos hace de la instrumentación el conjunto de herramientas que sirven para la medición, la conservación o transmisión de las variables, donde la transmisión ha permitido el avance tecnológico de la ciencia actual como la automatización de los procesos industriales.

“Sistema de monitoreo de nivel de líquido en grandes depósitos” [6], los resultados en cuanto al control de nivel digital, presenta que uno de los datos que puede proporcionar una aplicación web es información sobre registros históricos, el cual permite ver los datos almacenados en la base de datos, donde se puede ver la fecha, hora y nivel de líquido del tanque en el momento de la medición.

“Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques” [7], concluye que, con la implementación de un sistema de recirculación de líquido con el fin de aprovechar mejor el recurso hídrico del proceso, y mediante la implementación de una acción de control y modelamiento del sistema se complete la interacción de nivel de líquido en los tanques.

### **3.3 Sistema Didáctico**

Un sistema didáctico está en el desarrollo de una herramienta para la educación. Hoy en día ante la necesidad que se presenta en las instituciones de educación superior y en la industria de tener a la mano dispositivos de simulación de los diferentes procesos industriales para capacitar el personal e implementar nuevas estrategias de control.

### **3.3.1 Fundamentos Básicos Sobre un Módulo Didáctico**

Los módulos didácticos dentro de la educación muestran de manera comprensible la información de su funcionamiento, ya sea por medio de interfaces amigables basadas con elementos gráficos o como datos exactos para su procesamiento posterior, siempre y cuando con una carga teórica aportada por el modelo matemático, por resultados teóricos y simulaciones del fenómeno [8].

### **3.4 Sistemas de control**

De acuerdo a Katsuhiko, O [9], los sistemas de control son un conjunto de dispositivos que, para lograr un objetivo de control actúan juntos. Los sistemas de control automático dentro de los procesos industriales son muy importantes ya que suelen ser utilizados para varias aplicaciones con el fin de mejorar algún aspecto dentro de nuestra línea de proceso, como, por ejemplo: aumento de producción, mejoras en el rendimiento, mayor control de calidad, menor contaminación, mayor margen de seguridad, en algunos casos son empleados para reducción de gastos operativos en una planta.

Estos sistemas pretenden que se realicen operaciones en ausencia de personas (mano de obra). Los sistemas de control automático se dividen en sistemas de control en lazo cerrado y sistemas de control en lazo abierto.

### 3.4.1 Términos básicos para analizar un sistema de control

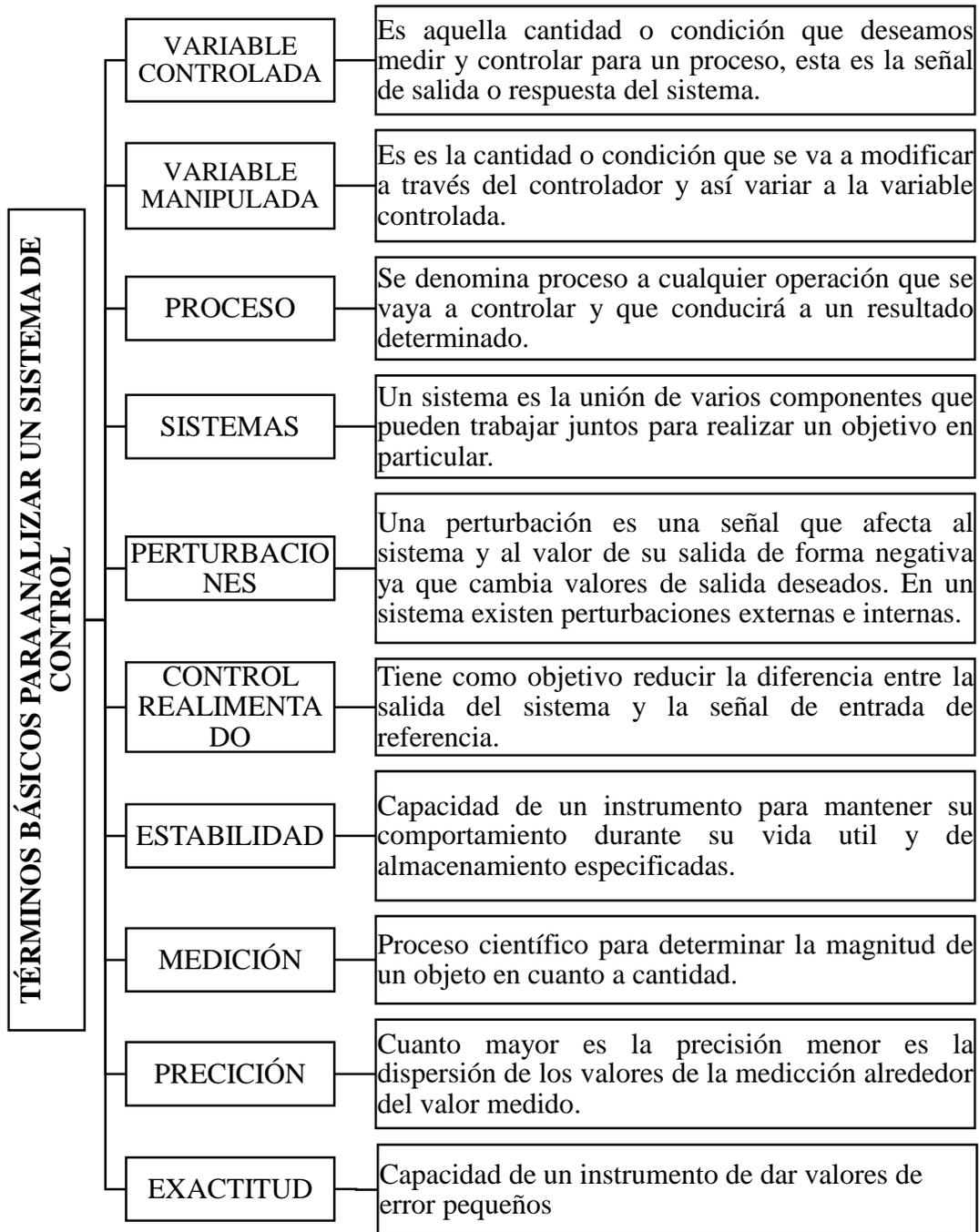
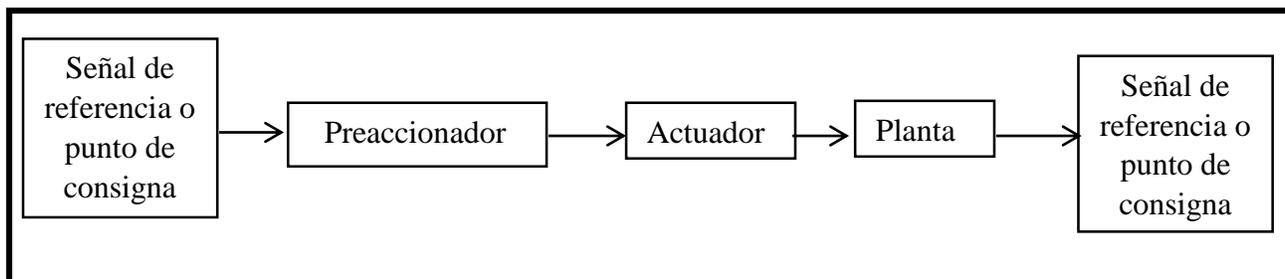


Figura 3.1. Términos básicos para un sistema de control

Fuente: [5]

### 3.4.2 Sistema de control en lazo abierto

Se caracteriza por que no recibe ninguna información o retroalimentación sobre el estado de la variable o aquellos en los que la señal de salida no afecta al funcionamiento del sistema total [10].



**Figura 3.2.** Diagrama esquemático de un sistema de control de lazo abierto

**Fuente:** [10]

#### 3.4.2.1 Características de un sistema de control de lazo abierto

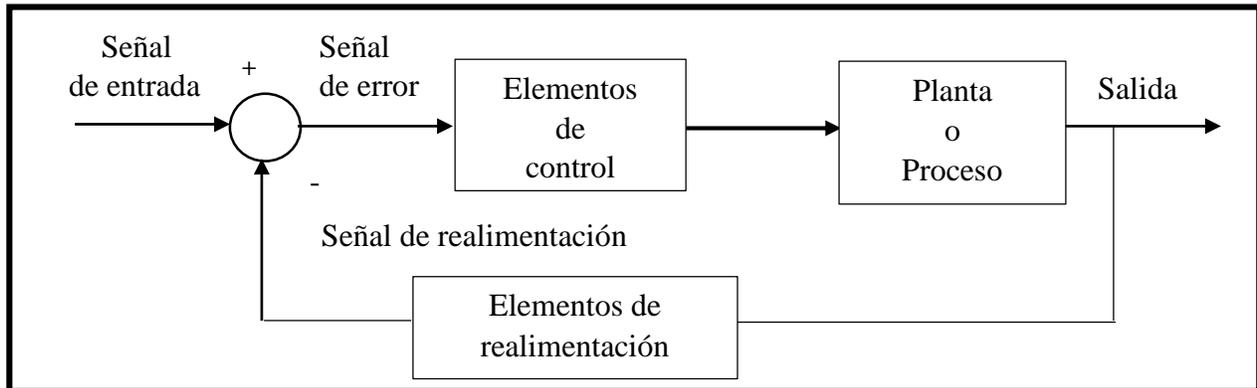
**Tabla 3.1.** Características de un sistema de control de lazo abierto.

SEÑAL DE MANDO	Instrucciones dadas por el operario para que se ejecute el sistema.
UNIDAD DE CONTROL	El transductor es aquel componente principal, capaz de interpretar la señal de comando estableciendo el valor de la señal de entrada.
ENTRADA	Es aquella señal generada por el transductor, de tal manera que es interpretada y ejecutada para el funcionamiento del sistema.
UNIDAD OPERATIVA	Esto es parte de la mejora continua del sistema.
SALIDA	Es el resultado de la operación del sistema y además puede usarse para obtener información y un producto terminado.
REGULADOR-CONTROLADOR	Aquel mecanismo responsable de regular el estado de carga de las baterías, así mismo como controlar la intensidad de carga.

**Fuente:** [11]

### 3.4.3 Sistema de control de lazo cerrado

Es aquel proceso donde se realiza el sistema de retroalimentación, de tal modo que se puede modificar la señal de referencia según la señal de salida, es decir la decisión depende de ambas tanto de entrada y salida [10].



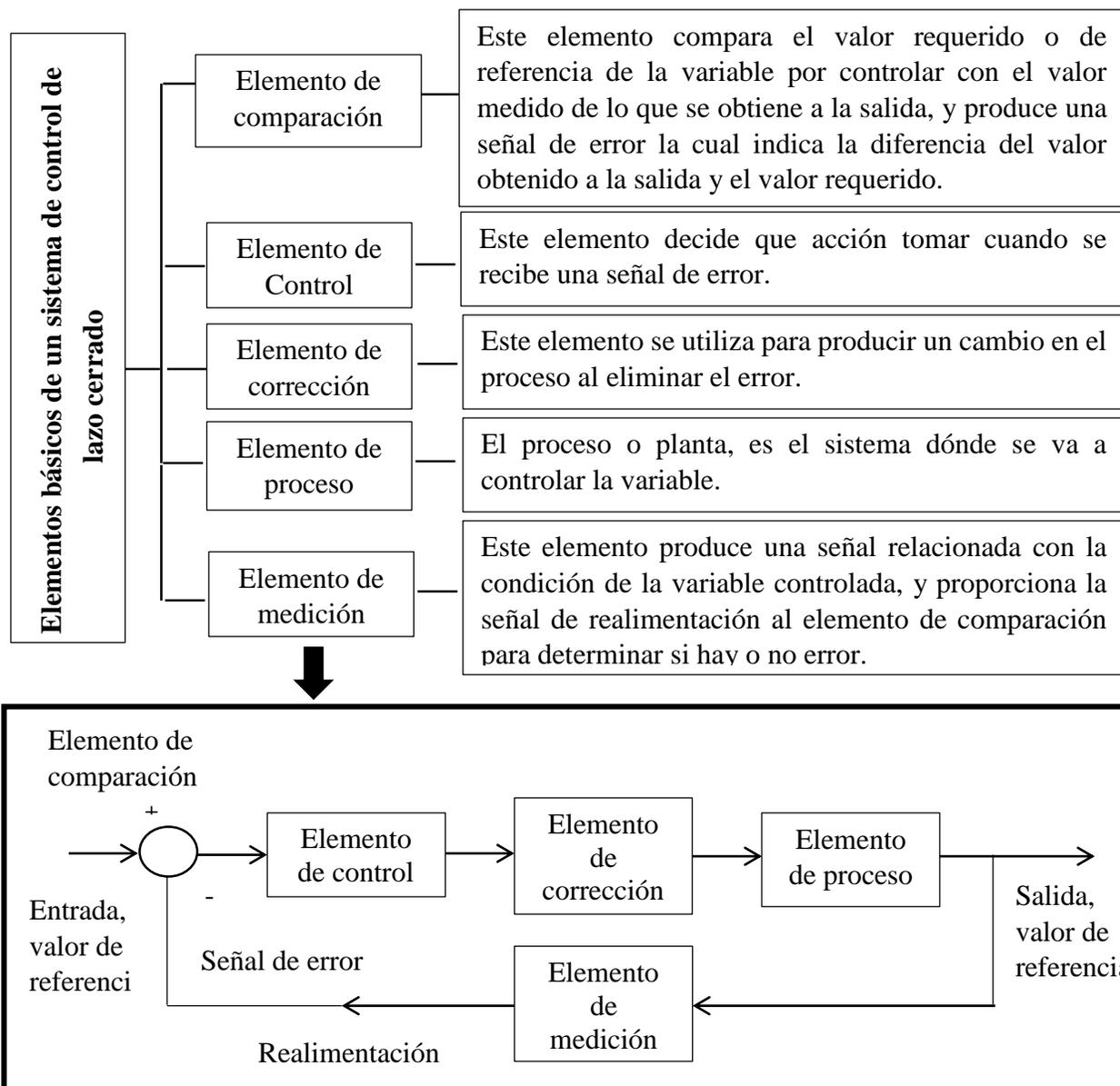
**Figura 3.3.** Diagrama esquemático de un sistema de control de lazo cerrado

**Fuente:** [11]

#### 3.4.3.1 Principales características de los sistemas en lazo cerrado

- Estos son sistemas complejos porque contienen una gran cantidad de parámetros.
- El control del sistema es afectado porque la salida se compara con la entrada.
- Este tipo de sistema son significativamente más estables a las perturbaciones y alteraciones internas.
- El sistema de lazo abierto tiene su diferencia con el sistema de circuito cerrado ya que este tiende a ser más preciso y exacto a la hora su proceso.

### 3.4.3.2 Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado



**Figura 3.4.** Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado.

Fuente: [12]

## 3.5 Componentes del sistema didáctico

### 3.5.1 Flujo

Es aquel líquido que circula por una parte de la tubería, cañería, oleoducto, entre otros por unidad de tiempo, por lo general se establece por el volumen o el flujo volumétrico de un área determinada por unidad de tiempo [13].

### 3.5.1.1 Sensores de Flujo

Los sensores de flujo utilizan diferentes principios de medición, es decir si se trabaja con fluido sobre la base de ultrasonidos los sensores de flujo funcionan correctamente, además la ventaja de medición sin contacto es que el sensor no tiende a sufrir golpes de ariete ni estar expuesto al medio sólido [14].

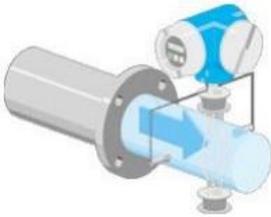
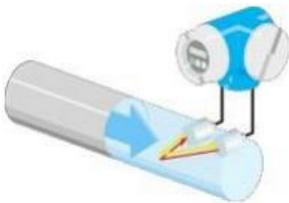


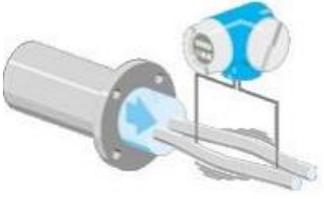
**Figura 3.5.** Sensor de Flujo

**Fuente:** [14]

### 3.5.1.2 Tipos de Sensores de Flujo.

**Tabla 3.2.** Tipos de sensores de flujo.

TIPOS DE SENSORES DE FLUJO		
Flujómetro Electromagnético	Se basan en la Ley de Faraday, es decir si en un campo magnético un conductor está en movimiento constante este inducirá voltaje.	
Tipo Turbina	Para el uso de piezas giratorias que son impulsadas por el flujo del líquido, este fluido en circulación gira a una velocidad proporcional.	
Medidores de flujo por Ultrasonido	Se basan en la propagación de ondas sonoras en fluidos, de tal manera que para esta medición hay dos principios básicos los cuales son el Tiempo de Transporte y Efecto Doppler.	

Flujómetros másicos	El medidor de flujo másico mide la masa del ciclo por unidad de tiempo. Los medidores de flujo tanto el de Coriolis y masicos térmicos son los más utilizados por las industrias.	
---------------------	---	---

Fuente: [14]

### 3.6 Bomba de agua

Es aquel dispositivo que se usa para bombear flujo de un lugar a otro, este movimiento suele ser ascendente, de manera que existen dos tipos de bombas “volumétricas” y “turbo-bombas”, además constan de un emboque de entrada que es de aspiración y otro emboque de salida la cual es de impulsión [15] .



Figura 3.6. Bomba Periférica de 1 HP

Fuente: [15]

### 3.7 Microcontrolador

El Arduino es una placa basada en un microcontrolador, además son circuitos integrados que fácilmente se pueden grabar instrucciones, de igual forma en el entorno de Arduino se puede escribir con el lenguaje de programación, vale mencionar que para crear programas que permitan interactuar con los circuitos de la placa es necesario tomar en consideración ciertas instrucciones para el correcto funcionamiento [16].

#### 3.7.1 Arduino Nano

Para la configuración de pines en el Arduino Nano hay que tomar en cuenta que corresponde a una cápsula cuadrada plástica delgada o conocida con sus siglas QFP que no es nada más que un empaquetado de circuito integrado para montaje superficial [17].

A continuación, se presenta en la figura (3.7) los elementos de la placa.

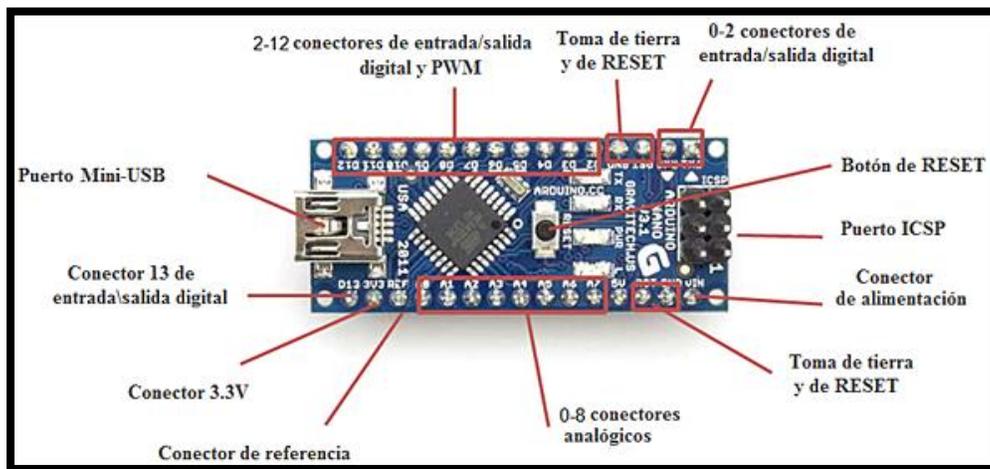


Figura 3.7. Microcontrolador Arduino

Fuente: [18]

### 3.7.1.1 Entradas y Salidas

Tabla 3.3. Entradas y Salidas del Microcontrolador.

<p>Entradas</p> <p>→</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Microcontrolador</p> </div>	<p>→</p> <p>Salidas</p>
<p>Dar información al sistema, son: sensores</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulsador</li> <li>• Potenciómetro</li> </ul>	<p>Procesa la información recibida de la entrada y envía el rendimiento a la salida.</p>	<p>Producen una actuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Led</li> <li>• Zumbador</li> <li>• Motor</li> </ul>

Fuente: [18]

### 3.7.2 Señales analógicas y digitales

Una señal es analógica cuando puede tomar infinitos valores entre su valor mínimo y máximo, mientras que una señal es digital cuando solo puede tomar 2 valores, el máximo asociado a 1 o a cierto “on” y el mínimo asociado a 0, falso “off”. [19]

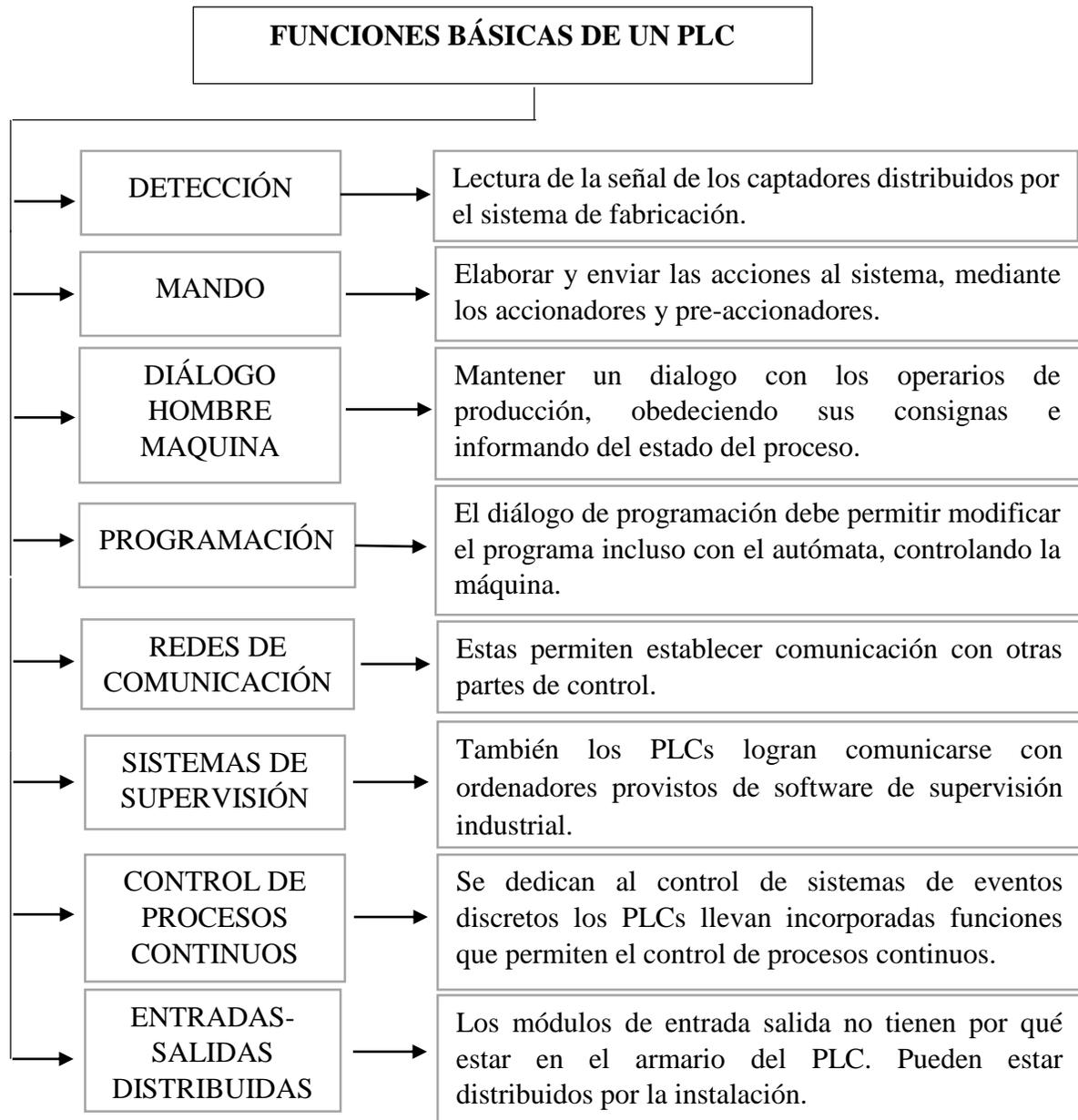
### 3.8 Controlador lógico programable (PLCs)

El PLC es conocido como un controlador lógico programable (PLC) o autómata programable industrial conocido por sus siglas (API), de igual modo programable en lenguaje no

informático, es decir está diseñado para realizar trabajos en procesos industriales, y controlar en tiempo real, entre otros [20].

### 3.8.1 Funciones básicas de un PLC

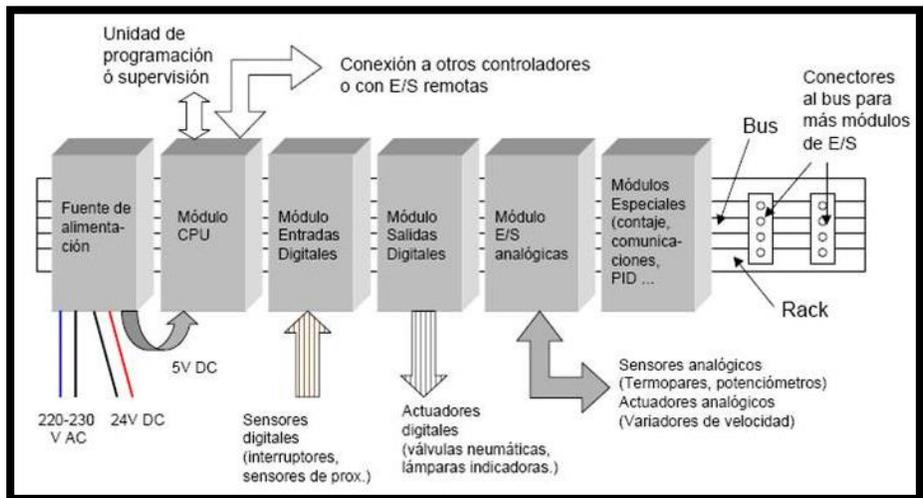
A lo largo de los años, se han desarrollado las funciones básicas y funciones principales del PLC, tales como el control automático, control de procesos, comunicación por red, control de movimiento, incluido el control de relés secuenciales.



**Figura 3.8.** Funciones específicas de un PLCs  
Fuente: [21]

### 3.8.2 Arquitectura del PLC

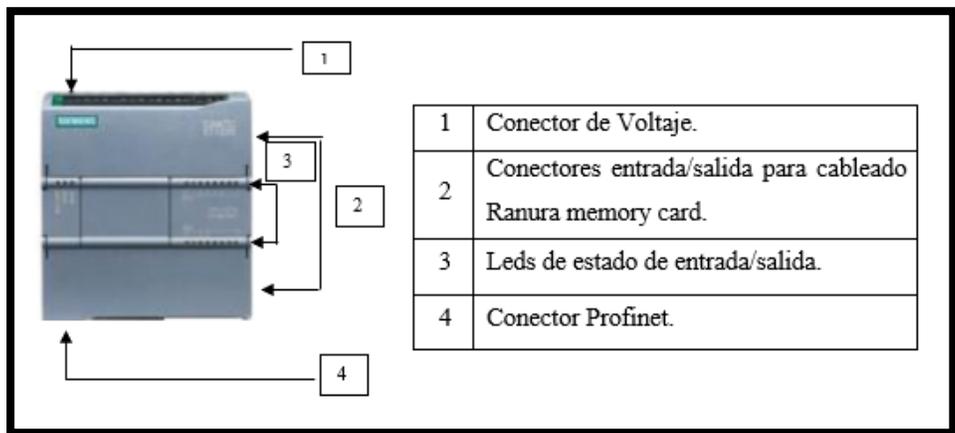
En la figura (3.9) se puede describir y evidenciar la arquitectura y esquema de un Controlador Lógico Programable.



**Figura 3.9.** Arquitectura del PLC  
Fuente: [22]

### 3.8.3 PLC Siemens S7-1200

El controlador lógico programable S7-1200 es ideal para controlar trabajos simples, a la vez es un modelo modular adecuado para pequeños sistemas de automatización que requieren funciones lógicas simples o avanzadas, HMI o networking, además el sistema de automatización S7-1200 está diseñado para ser utilizado en un entorno industrial, El PLC S7-1200 es el último producto de una serie de controladores SIMATIC de Siemens, cabe mencionar que es el sucesor del S7-200 [23].



**Figura 3.10.** Características del PLC S7-1200

### 3.8.3.1 Ventajas del PLC S7-1200

- El controlador lógico programable S7-1200 tiene funciones potentes, y puede controlar varios dispositivos para satisfacer diferentes necesidades de automatización.
- Debido a su diseño, configuración y amplio conjunto de instrucciones, el S7-1200 es ideal para controlar varias aplicaciones.
- Para la fabricación de equipo mecánico y construcción de una planta el PLC S7-1200 es una opción ideal para el control tanto en lazo abierto y lazo cerrado.
- El PLC S7-1200 es adecuado para diversas aplicaciones de automatización.

### 3.8.3.2 Funciones PLC S7-1200

A continuación, se presenta algunas características que ofrece el S7-1200.

**Tabla 3.4.** Funciones PLC S7-1200

<b>Módulos de Señales</b>	La CPU más grande admite la conexión de hasta 8 módulos de señales, lo que amplía la posibilidad de utilizar entradas y salidas analógicas o digitales.	
<b>Señales Integradas</b>	El módulo de señales integrado se puede insertar directamente en la CPU. De este modo pueden adaptarse individualmente las CPU, añadiendo entradas/salidas digitales o analógicas sin tener que aumentar físicamente el tamaño del controlador.	

<b>Módulos de Comunicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cada CPU S7-1200 puede expandirse hasta 3 módulos de comunicación.</li> <li>• Las conexiones punto a punto basadas en caracteres es adecuado utilizar los módulos de comunicación RS485 y RS232.</li> </ul>	
<b>Memoria</b>	<p>Le permite seleccionar el tamaño del programa y la memoria de datos, el controlador puede almacenar hasta 50 KB de memoria de trabajo, y configurar libremente el tamaño de la memoria del programa y los datos del usuario, se pueden definir hasta 2048 bytes.</p>	

Fuente: [23]

### 3.8.3.3 Características del PLC Siemens S7-1200, CPU 1212C.

Esta CPU dispone de las siguientes características:

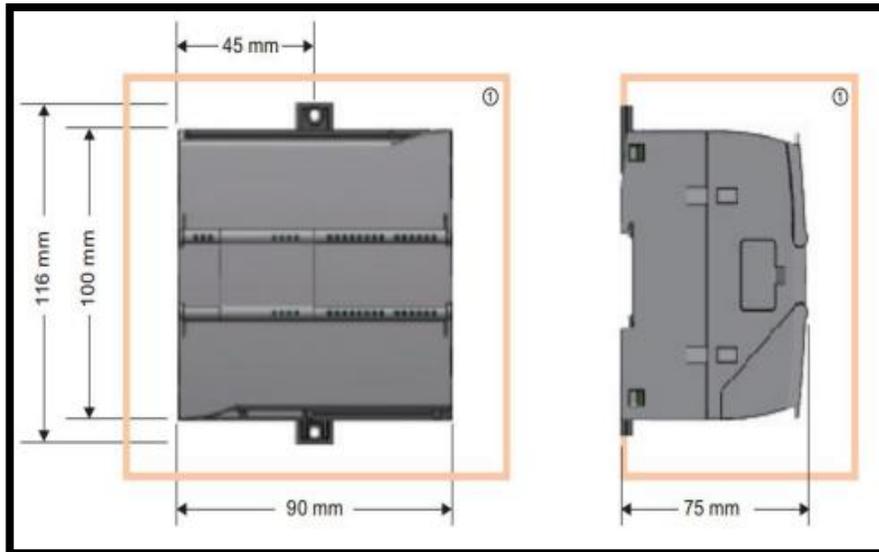


Figura 3.11. Tamaño físico PLC S7-1200, CPU 1212C

Fuente: [23]

**Tabla 3.5.** Características del PLC SIEMENS S7-1200, CPU 1212C

<b>Función</b>	<b>CPU 1212C</b>
Tamaño físico	90 mm x 100 mm x 75 mm
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memoria de Trabajo</li> <li>• Memoria de Carga</li> <li>• Memoria remanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 KB</li> <li>• 1 MB</li> <li>• 2KB</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrada/Salida digitales integradas</li> <li>• Entrada/Salida analógicas integradas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 entradas y 6 salidas</li> <li>• 2 entradas</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memoria imagen de proceso (entradas)</li> <li>• Memoria imagen de proceso (salidas)</li> <li>• Área de marcas (M)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1024 bytes</li> <li>• 1024 bytes</li> <li>• 4096 bytes</li> </ul>

Fuente: [23]

El PLC S7-1200 utilizado para datos analógicos puede entender [0; [27648] como el rango efectivo de la cantidad eléctrica estándar, dado que la señal de corriente estándar está entre 4 y 20 (mA), primero es necesario estandarizar los datos de entrada al rango considerado válido por el PLC [2].

$$Valor\ mínimo\ del\ PLC = \frac{Valor\ mínimo\ de\ corriente * Valor\ máximo\ del\ PLC}{Valor\ máximo\ de\ corriente} \quad (3.1)$$

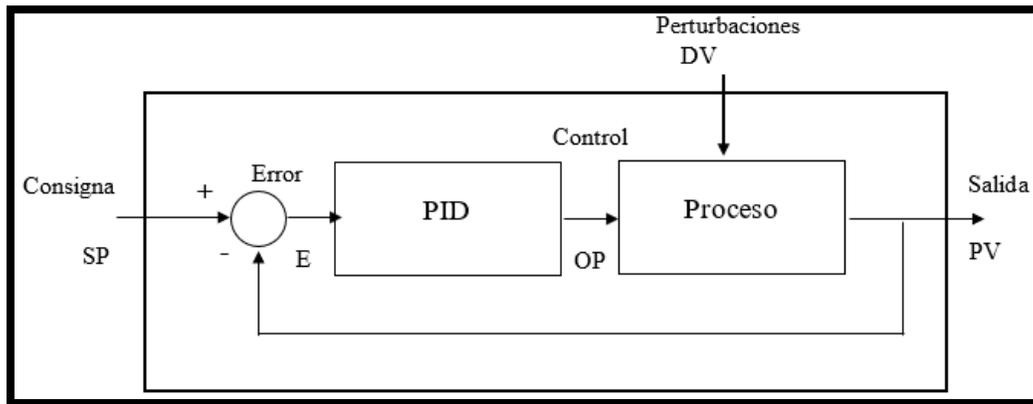
La programación y control del PLC es muy simple, por lo que puede ser completado por estudiantes con pocos conocimientos de electrónica, lo cual es suficiente para proporcionarles conocimientos de electrónica.

### 3.9 Controlador PID

Implementación del controlador PID basado en el pensamiento de retroalimentación reduciendo así la influencia causada por la perturbación y manteniendo la variable en el punto de ajuste, por lo que más del 95% de los bucles de control utilizan PID para resolver el problema de control. [24]

El PID tiene algunas funciones importantes:

- Utiliza la realimentación para rechazar las perturbaciones.
- Elimina el error estacionario con la acción.
- Puede anticipar el futuro con la acción derivativa.



**Figura 3.12.** Esquema básico de control PID.

Fuente: [24]

### 3.10 Métodos de sintonía de primer orden más tiempo muerto (FODT).

#### 3.10.1 Método de sintonía Lambda

El modelo de sintonía de lambda se utiliza con frecuencia en las industrias de procesos, por ende, este proceso se modela por el modelo FODT mostrado en la siguiente ecuación. [25]

$$P(s) = \frac{k_p}{1+sT} * e^{-sL} \quad (3.2)$$

Con la ecuación (3.3) se puede obtener el diseño PID, use la forma interactiva del controlador que se usa en la siguiente ecuación.

$$C'(s) = K' \frac{(1+sT'_i)(1+sT'_d)}{sT'_i} \quad (3.3)$$

Donde:

$K'$  = Ganancia Proporcional

$T'_i$  = Tiempo Integral

$T'_d$  = Tiempo Derivativo

En la siguiente ecuación se puede visualizar el tiempo muerto de la función de transferencia del sistema.

$$P(s) = \frac{k_p}{1+sT} e^{-sL} \approx \frac{k_p \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{(1+sT)\left(1 + \frac{sL}{2}\right)} \quad (3.4)$$

El tiempo integral se escoge como  $T'_i = T$  y el tiempo derivativo como  $T'_d = L/2$ . Entonces, el cero del controlador derogará el polo del sistema, en la siguiente ecuación muestra la función de transferencia del bucle. [25]

$$G_1(s) = P(s)C'(s) \approx \frac{k_p K' \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{sT} \quad (3.5)$$

La ecuación característica se muestra en la siguiente ecuación.

$$s \left( T - k_p K' \frac{L}{2} \right) + k_p K = 0 \quad (3.6)$$

Se exige que el polo en el sistema cerrado sea  $s = -1/T_{cl}$  el cual lo encontrado se mostrara en la siguiente ecuación.

$$k_p K' = \frac{T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (3.7)$$

Que da las reglas de sintonía mostradas en las siguientes ecuaciones.

$$K' = \frac{1}{k_p} \frac{T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (3.8)$$

$$T'_i = T \quad (3.9)$$

$$T'_d = \frac{L}{2} \quad (3.10)$$

La siguiente ecuación muestra los parámetros del controlador PID no interactivo.

$$K = \frac{1}{k_p} \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad (3.11)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (3.12)$$

$$T_d = \frac{TL}{L+2T} \quad (3.13)$$

### 3.10.2 Método de sintonía de Cohen-Coon

Este método se basa en un modelo FODT donde el proceso se caracteriza por tres parámetros ( $k_p$ ,  $L$ ,  $T$ ), por ende, estos parámetros del controlador se expresan en términos de los mismos [26].

Las ecuaciones de sintonía se muestran a continuación:

$$K = \frac{1.35(1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau})}{a} \quad (3.14)$$

$$T_i = L \left( \frac{2.5 - 2.0\tau}{1 - 0.39\tau} \right) \quad (3.15)$$

$$T_d = L \left( \frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau} \right) \quad (3.16)$$

Donde:

$$a = \frac{k_p L}{T} \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} \quad (3.18)$$

### 3.10.3 Método de sintonía de Ziegler and Nichols

El método incluye obtener la respuesta de la señal medida a la interferencia, La regla propuesta por Ziegler y Nichols determina los valores de la ganancia proporcional  $K_p$  tiempo integral  $T_i$ , y el tiempo derivado  $T_d$ , según las características de una determinada planta. El método es basado en los parámetros del sistema FODT [26].

A continuación, se muestran las siguientes ecuaciones. Los parámetros de ajuste del controlador se basan en los parámetros del modelo mencionado.

$$K = 1.2 \frac{T}{L} \quad (3.19)$$

$$T_i = 2L \quad (3.20)$$

$$T_d = 0.5L \quad (3.21)$$

### 3.11 Método de sintonía para procesos integrantes más tiempo muerto (PID)

El método de ajuste que se describe se basa en el modelo que se muestra a continuación [27].

$$G(s) = \frac{km}{s} e^{-s\tau_m} \quad (3.22)$$

#### 3.11.1 Astrom y Hagglund (1995)

$$K = \frac{0.94}{k_m\tau_m} \quad (3.23)$$

$$T_i = 2\tau_m \quad (3.24)$$

$$T_d = 0.5\tau_m \quad (3.25)$$

#### 3.11.2 Ford (1953)

$$K = \frac{1.48}{k_m\tau_m} \quad (3.26)$$

$$T_i = 2\tau_m \quad (3.27)$$

$$T_d = 0.37\tau_m \quad (3.28)$$

#### 3.11.3 Zou al (1997), Zou y Brigham (1998)

$$K = \frac{2}{k_m(\lambda+0.5\tau_m)} \quad (3.29)$$

$$T_i = 2\lambda + 2\tau_m \quad (3.30)$$

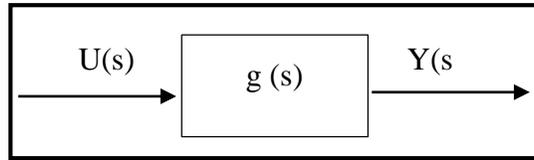
$$T_d = \frac{\lambda+0.25\tau_m}{2\lambda+\tau_m} \quad (3.31)$$

Donde:

$$0.5\tau_m \leq \lambda \leq 3\tau_m \quad (3.32)$$

### 3.12 Función de transferencia de sistemas de primer orden

Las características dinámicas de las plantas pueden aproximarse a las características temporales de sistemas más simples, es decir un modelo simple debe entenderse como un modelo cuya dinámica está definida por ecuaciones diferenciales lineales de primer o segundo orden [28].



**Figura 3.13.** Función de transferencia  
**Fuente:** [28]

La función que asocia la salida con la entrada se llama función de transferencia  $g(s)$ .

De modo que:

$$Y(s) = g(s) * U(s) \quad (3.33)$$

### 3.13 Interfaz gráfica

Para el desarrollo de la interfaz gráfica es necesario proporcionar un entorno visual que tenga una manipulación sencilla, con el fin de permitir la comunicación con la planta a simular.

El software Labview es un entorno de programación grafica que cumple con los requerimientos para implementar una interfaz de usuario. Mientras que Unity 3D es una herramienta que permite el diseño de videojuegos en 3D, lo que nos facilita diseñar y visualizar la simulación del control de flujo de la planta virtual.

#### 3.13.1 Software para control de procesos (Labview Demo)

LabVIEW Demo es un software de ingeniería de sistemas que requiere de pruebas, medidas y control en donde se conecta a un hardware e información de datos, este software ofrece un enfoque de programación grafica que le permite al usuario visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medida y depuración, esta visualización permite una fácil integración de hardware de cualquier proveedor, representar una lógica compleja en forma de diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar una interfaz de usuario personalizada [29].



**Figura 3.14.** Portada del programa LabVIEW.

**Fuente:** [29]

### 3.13.2 Matlab

Matlab cuya abreviatura es (MATrix LABoratory o Laboratorio de matrices), como un sistema de cómputo numérico, que maneja un lenguaje propio y de alto nivel (lenguaje M) para cálculos científicos y de ingeniería, sirve para analizar y diseñar sistemas y productos, y está presente en sistemas de seguridad, naves espaciales, dispositivos de monitorización de salud, también se utiliza para el procesamiento de señales, imágenes, comunicaciones, robótica, entre otros campos, dado que está disponible para plataformas como Unix, Windows, Mac, Linux [29].



**Figura 3.15.** Portada del MATLAB.

**Fuente:** Mathworks

### 3.14 Unity 3D

Unity es una herramienta que nos permite simplificar la complejidad de cualquier trabajo y presentar grandes proyectos a los usuarios de una manera más digerible.

Unity es una herramienta que no solo incluye un motor para renderizar imágenes, física 2D / 3D, audio, animación y otros motores, sino que también incluye herramientas de red para juegos multijugador, herramientas de navegación NavMesh para inteligencia artificial o soporte para herramientas realistas virtuales [30].

Unity 3D es un software para desarrollar videojuegos, permite la creación de juegos en múltiples plataformas con son PlayStation, Xbox, PC, Mac, iOS, Android, etc.



**Figura 3.16.** Software 3D para modelos BIM en realidad aumentada.

**Fuente:** [31]

### **3.14.1 Características de Unity**

Una de las características más importantes y más cómodas de Unity es que soporta la exportación a una cantidad enorme de plataformas, podemos elegir la plataforma con la que vamos a trabajar creando y editando nuestro proyecto, sino cuyo editor soporta Windows y MacOS, además de Linux de forma experimental [30].

### **3.14.2 Resultados en Unity**

- La creación optimizada de experiencias 3D en tiempo real lleva minutos en lugar de días para optimizar grandes modelos de diseño.
- El acceso democratizado a BIM pone fácilmente la información en manos de los usuarios, en cualquier dispositivo.
- Una mejor comunicación con las partes interesadas clave conlleva a reducir los órdenes de cambio, el tiempo de construcción y los costos.

### **3.15 Realidad virtual en la educación**

Para los centros educativos y universidades se ha logrado observar los avances tecnológicos y las comunicaciones en los procesos de aprendizaje que cada día son más sofisticados como la utilización de tecnologías basadas en inteligencia artificial. La realidad virtual en Latinoamérica no es acogida a los avances tecnológicos y cuesta adaptarse como cierta herramienta importante aporta a la educación.

Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación ofrecen diversidad de medios y recursos para apoyar la enseñanza; sin embargo, no es la tecnología disponible el factor que debe determinar los modelos, procedimientos, o estrategias didácticas, la creación de ambientes virtuales de aprendizaje debe inspirarse en las mejores teorías de la psicología educativa y de la pedagogía [32].

## **4. METODOLOGÍA**

El proyecto de titulación consiste en el diseño de un sistema didáctico virtual de control de flujo, donde se orienta hacia un estudio de tipo descriptivo, posteriormente se adquirió el modelo matemático para obtener el comportamiento del proceso de la planta real y utilizando el software Unity3D se diseñó un entorno virtual que refleje el módulo físico existente en el laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi con el propósito de lograr que los estudiantes puedan realizar prácticas de estudio, ya que aporta al desarrollo de su aprendizaje teórico práctico.

El proyecto de titulación se enfocó en diferentes modalidades, por el nivel de profundidad, ya que se trabajó en la manera descriptiva y explicativa donde permitió con este tipo de investigación hacer una descripción técnica del software de programación para un módulo de prácticas comandada por un de PLC. Por el método inductivo que se utilizó para los análisis de la investigación que se obtuvo durante el proceso de recopilación de los requerimientos y características para el diseño y desarrollo del modelo tecnológico, y por el método deductivo donde permitió aglutinar la información secundaria obtenida a través de, manuales, textos, revistas, páginas de internet entorno a la programación de procesos para un módulo de prácticas comandada por un PLC.

El estudio se basó en realizar módulo virtual de control de flujo para el aprendizaje en el laboratorio de investigación de automatización y control mediante la utilización de software Unity3D dando como resultado la digitalización de los diagramas que contiene toda la información técnica para su correcta utilización.

Los métodos de llenado de flujo son muy indispensables en las industrias, por ende, estos son controlados por actuadores y sensores de forma automática a través de un programador lógico controlado o algún circuito de control eléctrico común.

#### 4.1 Generalidades

El funcionamiento correcto del sistema virtual de control de flujo requiere tanto de una cierta secuencia para su correcto funcionamiento, como sus partes, elementos diseñados correctamente en el software. Por ende, se realizaron pruebas cuyos resultados permiten determinar las características de funcionamiento de cada uno de los componentes principales y ser usados como referencias para posteriores análisis.

#### 4.2 Normas para los instrumentos de medición de flujo

**Tabla 4.1.** Normativas.

<b>Norma</b>	<b>Significado</b>	<b>Especificación</b>
<b>ANSI/ISA-S5</b>	(American National Standards Institute) (Instrument Society of America)	Identificación y símbolos de instrumentación.
<b>ANSI/ISA-S5.5</b>	(American National Standards Institute) (Instrument Society of America)	Símbolos gráficos para visualización de procesos
<b>ISO-17025</b>	(Instrument Society of America)	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
<b>ISO 9000</b>	(Instrument Society of America)	*Compendio de Normas Internacionales para la Gestión de la Calidad. *Fundamentos de la gestión de la calidad y terminología.
<b>ISO 9001</b>	(Instrument Society of America)	Requisitos del proyecto, fabricación, instalación, y servicios de productos.

### 4.3 Descripción general del sistema de control

A continuación, se presenta un esquema general de funcionamiento (figura 4.1) donde se puedan observar cada uno de los componentes utilizados en la implementación del entorno virtual de control de flujo para el aprendizaje del control de procesos en el módulo de investigación de automatización y control.

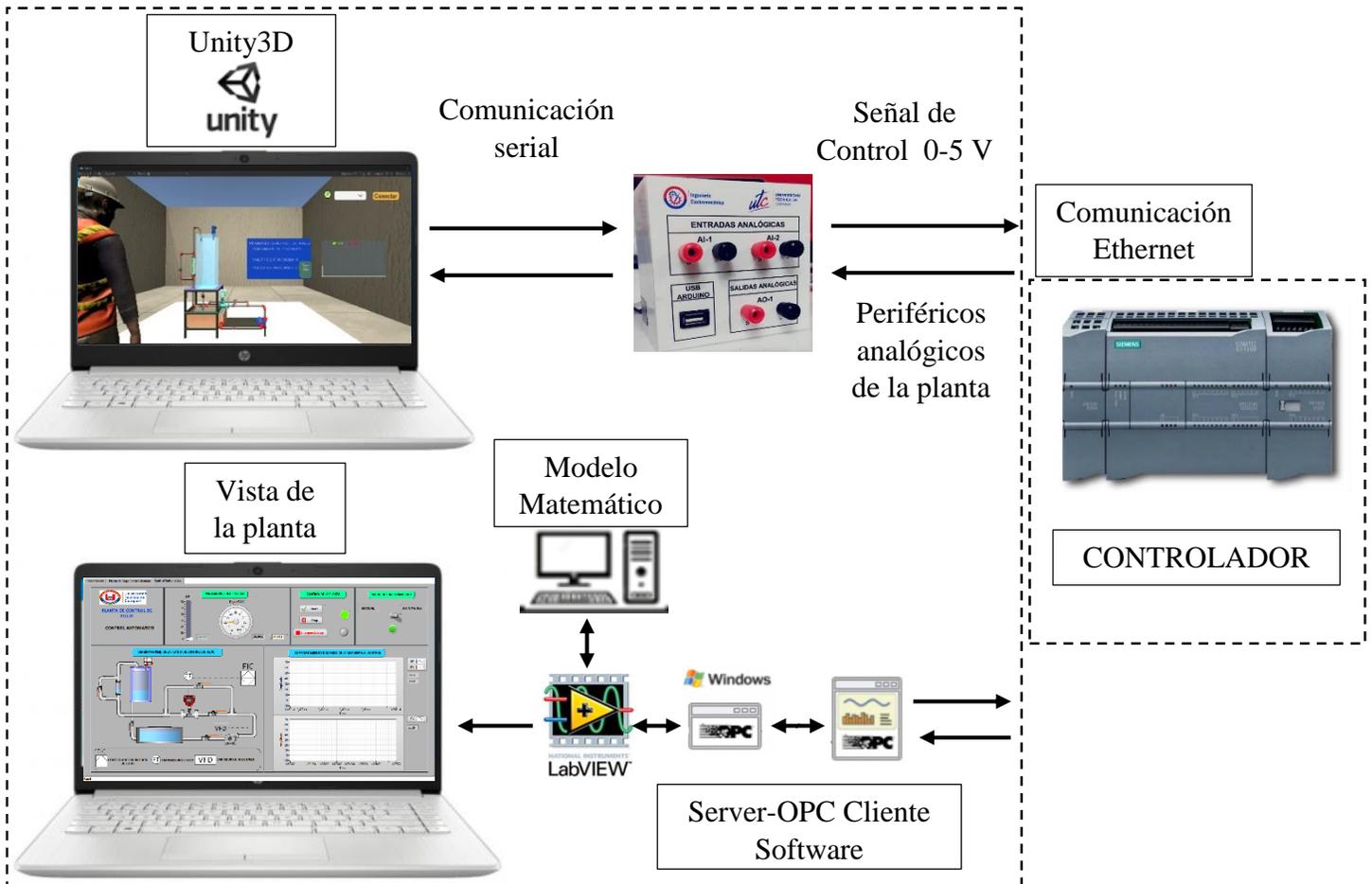


Figura 4.1. Esquema general de funcionamiento.

Se pretende que el sistema interactúe entre software de control y Unity3D para que exista el intercambio de los datos relevantes para el proceso a controlar, por ende, se desarrollaron las diferentes programaciones y diseño de interfaces en cada uno de forma individual, para lo cual después implementar un tipo de conexión entre sí a través del procedimiento de comunicación.

## 4.4 Dinámica del comportamiento de la planta

Para adquirir la dinámica del proceso de flujo es preciso disponer de la planta física de esta manera se debe adquirir una base de datos dando valores de entrada (CV) y obteniendo como respuesta un valor salida (PV), después de realizar varias pruebas experimentales se llegará a la obtención del modelo matemático del comportamiento de la planta.

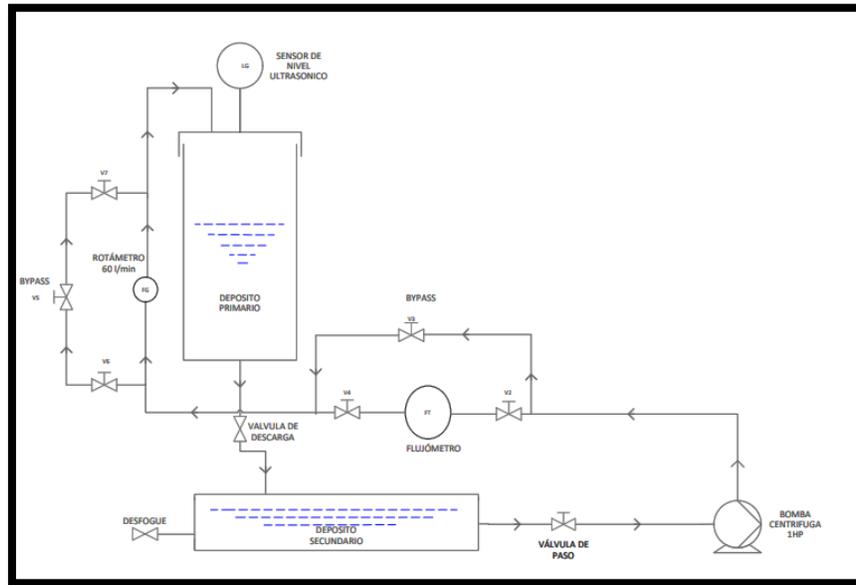


Figura 4.2. Diagrama de la planta física.

## 4.5 Identificación de la función de transferencia en Matlab

### 4.5.1 Modelo Matemático

Para obtener el modelo matemático de la planta real de flujo se realizó pruebas experimentales implantando variables de entrada (CV) y obteniendo variables de salida (PV) donde hubo ciertos inconvenientes ya que al momento de obtener la dinámica del proceso se pudo visualizar que la válvula provocaba cambios imprevistos en la medición de flujo el cual ocasionaba que los datos obtenidos no sean los correctos. Una vez obtenido la dinámica del proceso de la planta por medio de un análisis matemático se generó una base de datos en Excel del comportamiento de la planta física y mediante el software MATLAB utilizando la herramienta “systemIdentification” donde se ingresó los datos obtenidos de entrada (CV) y de salida (PV) se obtuvo la gráfica de la dinámica real del proceso como se puede observar en la (figura 4.3).

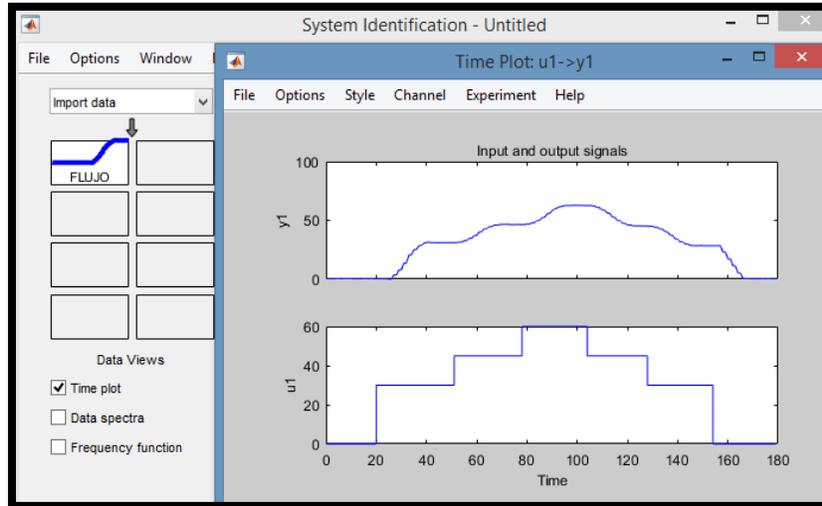


Figura 4.3. Comportamiento del flujo de la planta física.

#### 4.5.2 Función de transferencia

Mediante las pruebas experimentales realizadas se definió que la respuesta de la mejor dinámica del sistema es del 89.93 % de similitud el cual es mayor al 80% cumple con el porcentaje de aceptación y de esta manera se puede estipular que el sistema es válido para ser utilizado en un entorno virtual.

De esta manera procedemos a obtener la función de transferencia con la respuesta de la dinámica del proceso más similar a la del sistema real como se observa en la (figura 4.4).

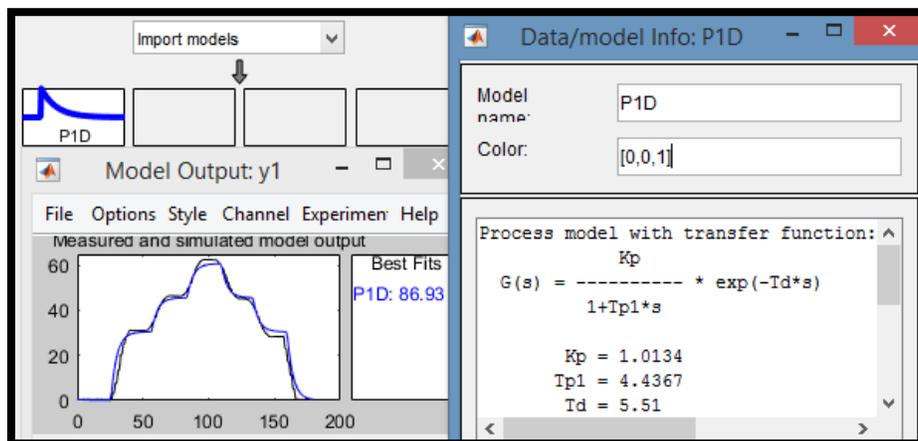
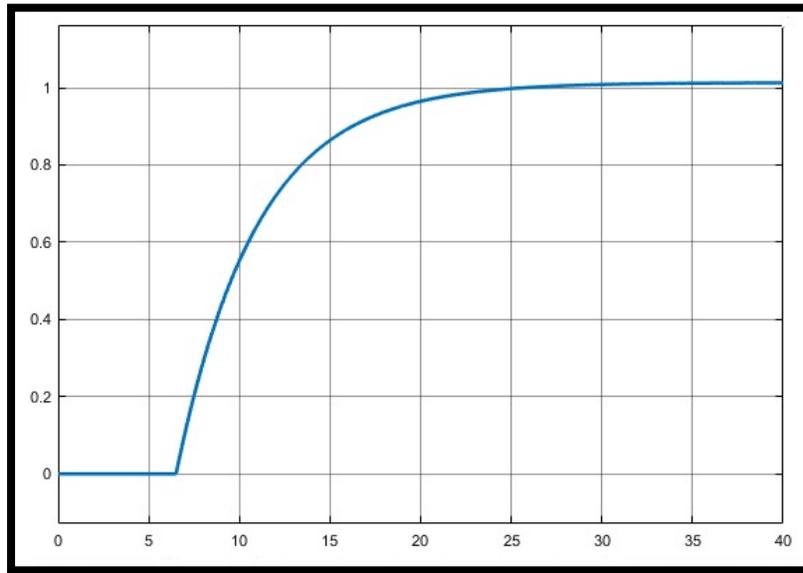


Figura 4.4. Función de transferencia.

Con la función de transferencia adquirida y utilizando la herramienta “Transient Response” obtenemos la gráfica de respuesta al escalón con una amplitud de 1.01%, un tiempo de

estabilidad de la curva de 40 segundos y un retardo de 5.51 segundos como se puede observar en la (figura 4.5).



**Figura 4.5.** Respuesta al escalón del proceso.

A continuación, se muestra la función de transferencia que se utilizara.

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1*s} * e^{-\tau_d*s} \quad (4.1)$$

$$G(s) = \frac{1.0134}{4.4367 s+1} * e^{-5.51*s} \quad (4.2)$$

Donde  $Kp = 1.0134$  que es la ganancia propia del sistema,  $L = 5.51$  que representa al tiempo muerto y  $T = 4.43675$  es la constante de tiempo del sistema.

#### 4.6 Implementación del entorno virtual

Para la implementación de la planta virtual se utilizó el software de dibujo CAD-3D (diseño asistido por computadora), el cual permite diseñar y simular plantas industriales de forma tridimensional y planos en forma bidimensional. De igual forma se utilizó Unity3D para graficar los diferentes componentes de la planta virtual donde nos permite crear modelos y entornos animados en tiempo real. Para el diseño de la planta virtual se ha realizado un control PID programado en el PLC y un HMI (Interfaz Humano-Maquina), donde se realizará el monitoreo y control de la simulación del proceso.

## 4.6.1 Estructura de la Planta Virtual

### 4.6.1.1 Diseño de la estructura en un software de dibujo CAD

El software de dibujo CAD permite diseñar esquemas en 2D a partir de los ensamblajes en 3D, donde las piezas, los ensamblajes y los dibujos están vinculados a los documentos, así mismo cualquier cambio que se ejecute en una pieza o un ensamblaje cambia el documento de dibujo. Al crear modelos en el software de dibujo CAD, se desarrollan croquis de entidades geométricas de manera aproximada y luego se agrega cotas exactas a las entidades.

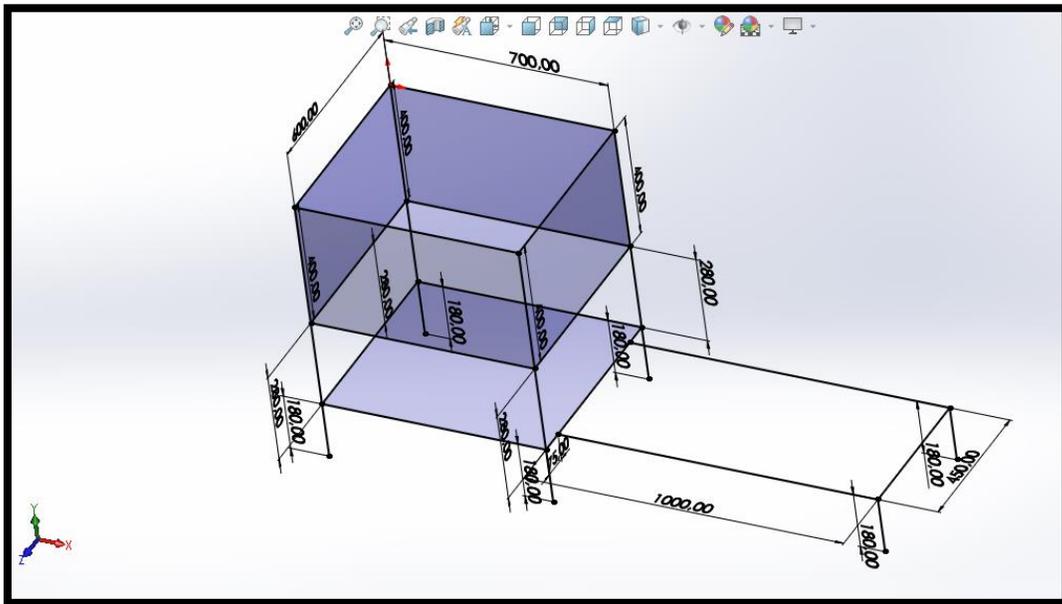


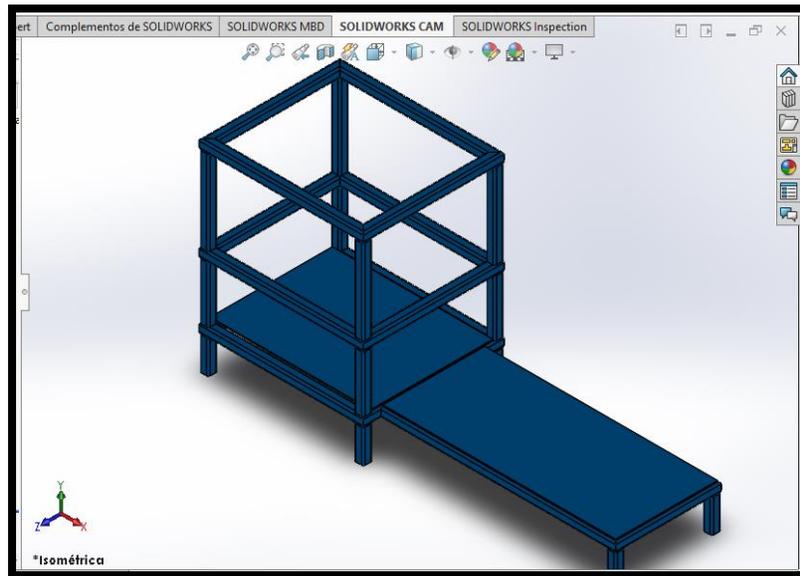
Figura 4.6. Diseño de la estructura en el software de dibujo CAD 2D.

### 4.6.1.2 Modelo en software de dibujo CAD 3D

Una vez diseñada la base se realizó los siguientes procedimientos como es la extrusión, el recubrimiento, y el aumento del espesor de una superficie. Sin embargo, la mayoría de operaciones base son extrusiones.

Al extruir el modelo de la planta se establece una acción por medio de una extrusión de un objeto en 3D a partir de un croquis en 2D, principalmente añadiendo la tercera dimensión. No obstante, una extrusión puede ser una base, un saliente o un corte. Al recubrir el modelo de la planta se establece una acción agregando transiciones entre perfiles donde el recubrimiento puede ser una base, un saliente, un corte o una superficie.

Dentro del Contorno para el modelo de la planta se establece operaciones exactas, que reflejan ser útiles para los mercados de diseño de productos de consumo, médico, aeroespacial y de moldes. Por esa razón un contorno puede ser una base, un saliente, un corte o una superficie.



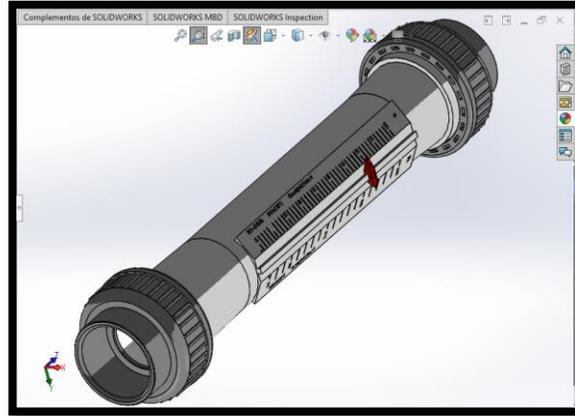
**Figura 4.7.** Diseño de la estructura en 3D.

#### **4.7 Diseño de componentes en CAD-3D**

En el software de dibujo CAD-3D se creó las diferentes piezas y componentes de la planta en un entorno de ensamblaje donde se puede apreciar el comportamiento de cada uno de los componentes, además estos pueden ser almacenados como elementos virtuales dentro de un documento de ensamblaje de una planta un documento externo independientemente.

##### **4.7.1 Diseño del Rotámetro**

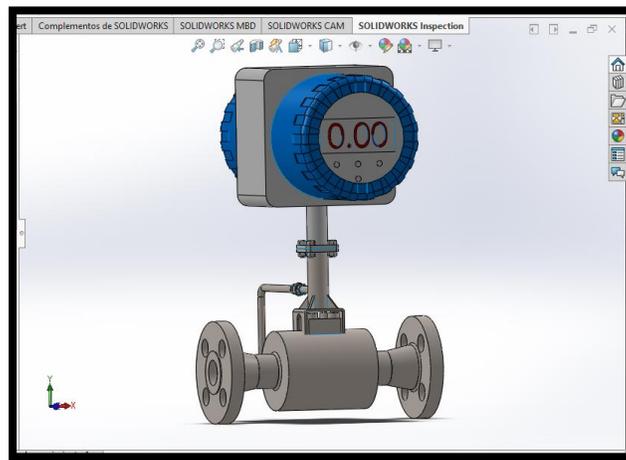
El rotámetro es un tipo de caudalímetro enfocado en el área industrial el cual consiste de un flotador (indicador), nos indica la medición de flujo visual en un rango de 0 a 100 l/min. El cual es utilizado para la toma datos de flujo de caudal desde el entorno virtual en Unity3D según los límites del eje del rotámetro, como se muestra en la Figura (4.33).



**Figura 4.8.** Diseño del Rotámetro.

#### **4.7.2 Diseño del Caudalímetro**

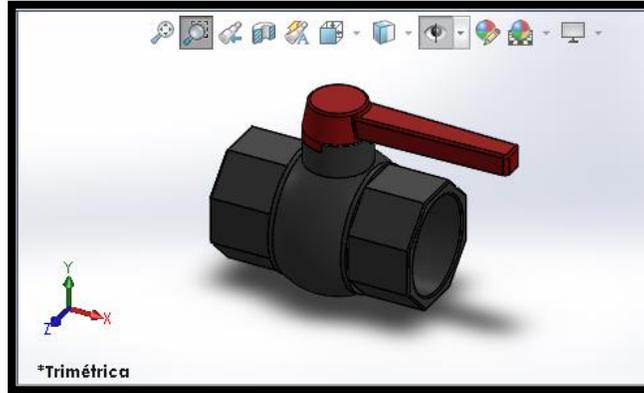
El caudalímetro ha sido diseñado para indicar la medición de flujo en un rango de 0 a 100 l/m, el cual se utiliza para medir la velocidad de flujo lineal del líquido que fluye a través de la tubería haciendo que un pistón o una turbina giren. Este aparato dispone de varios beneficios como una excelente resolución, precisión y exactitud para la medición de líquidos.



**Figura 4.9.** Diseño del Caudalímetro.

#### **4.7.3 Diseño de Válvulas**

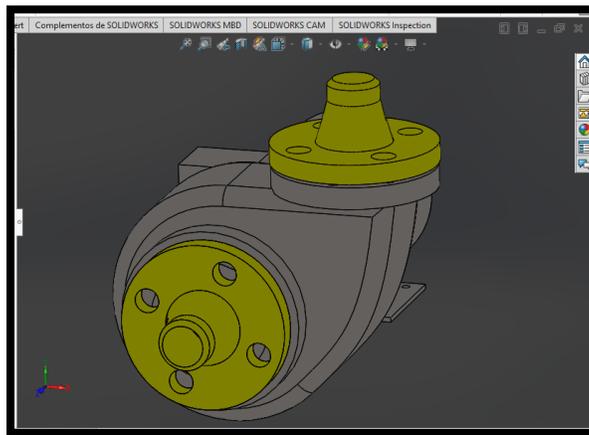
Las válvulas de bypass para una tubería fueran diseñadas para que exista el corte o desvío del fluido y generalmente son las más habituales dentro de un circuito, también actúan como una línea de respaldo para anular un elemento de la instalación, con el fin de hacer tareas de mantenimiento correctivo.



**Figura 4.10.** Diseño del Válvulas.

#### 4.7.4 Diseño de la Bomba

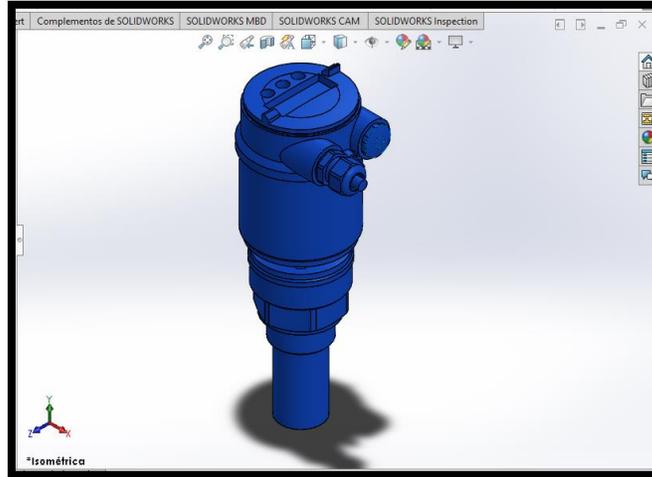
La bomba siendo el componente más importante del módulo fue diseñada para impulsar el fluido hidráulico en el sistema. En el módulo virtual la bomba básicamente va a proporcionar el flujo de entrada al tanque principal por lo que para su selección se toma en cuenta el voltaje (V), la potencia (HP), la frecuencia (Hz) y el flujo (l/m).



**Figura 4.11.** Diseño de la bomba.

#### 4.7.5 Diseño del Sensor de Nivel

El sensor de nivel ultrasónico es aquel dispositivo que mide la elevación del líquido dentro de un recipiente. Por esta razón este sensor fue diseñado porque funciona como un tipo de alarma el cual indica si existe un exceso de llenado cuando el nivel determinado ha sido adquirido, o como un tipo de marcador para verificar su estado de nivel inferior. Donde sus salidas son de tipo analógicas, el cual consta de una pantalla digital con una alimentación de 24V y su señal es de un rango de 4 a 20 mA, como se muestra en la figura (4.12).

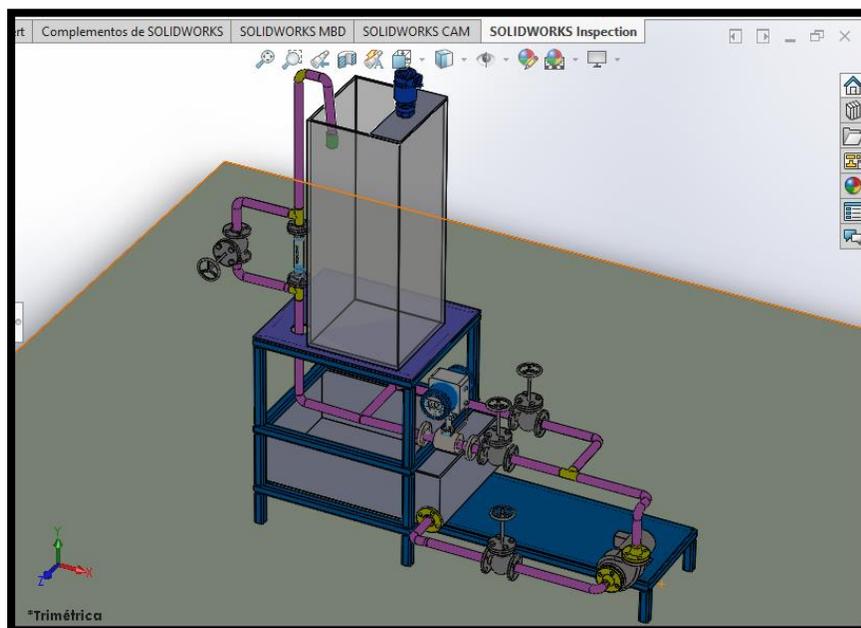


**Figura 4.12.** Diseño del sensor de nivel.

#### **4.7.6 Ensamblaje de la planta virtual de flujo**

El módulo diseñado integra todos los componentes y dispositivos con la textura que tienen en un ambiente virtual para la planta donde podremos realizar simulaciones en tiempo real de la función que ejecutan cada uno de los componentes dentro de la planta de control de flujo como se aprecia en la figura. (4.13).

Los modelos a continuación representan la textura que tienen en un ambiente virtual y la función que realiza dentro de la planta de control de flujo.



**Figura 4.13.** Ensamblaje de la planta virtual de flujo.

Los elementos diseñados en el software de dibujo CAD-3D u otro software similar no deben importarse directamente a Unity3D por su capacidad de ram o peso de las piezas. Para utilizar los diferentes componentes de este programa se debe exportar a programas como Maya o Blender ya que son los más utilizados y luego limpiar los modelos, Unity3D admite archivos (FBX), (dae), (Collada), (3DS), (dxf) y (obj).

#### 4.8 Diseño del entorno virtual en Unity3D

El diseño de la planta fue realizado en un software de dibujo CAD-3D, el cual fue importado en un formato. fbx utilizando las herramientas del software de dibujo CAD-3D como es “visualize” y así obtener el entorno virtual en Unity3D, donde se procedió a añadir texturas a todos los objetos para conseguir un entorno virtual realista.

A continuación, se muestra en la figura (4.14) el entorno virtual con todas sus texturas.



Figura 4.14. Entorno virtual en Unity3D.

##### 4.8.1 Diseño de la placa del tablero de interconexión en Proteus

A continuación, se identifica el diseño de la placa que se realizó en Proteus donde podemos visualizar las conexiones para el “Arduino nano”, el “Módulo I2c Conversor Digital Análogo Dac Mcp 4725” y sus respectivas borneras son las salidas y entradas analógicas (AO1) y (AI1, AI2)

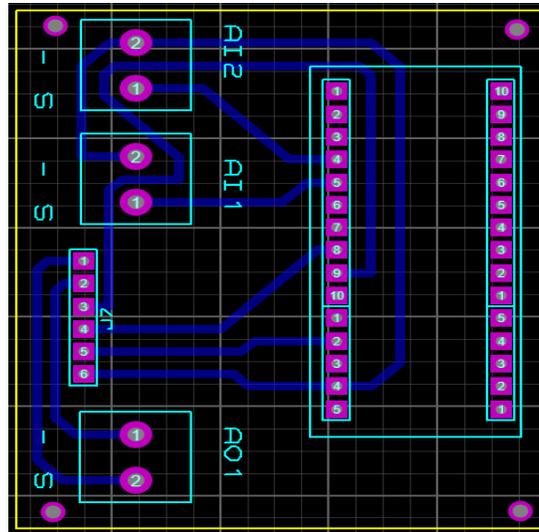


Figura 4.15. Identificación de la placa en Proteus.

#### 4.9 Tablero de interconexión entre PLC y Unity3D

Con el diseño del tablero de control de interconexión se consideró un tablero de Acrílico de color blanco con las siguientes medidas: 10 cm de ancho, 10 cm de largo y 5 cm de alto.

De esta manera el PLC ubicado en el tablero principal tiene como finalidad enviar las señales digitales y analógicas de 0 a 10 V al tablero de interconexión, además en la programación se acondiciono la señal de 0 a 60 con la entrada expresado con un valor entre 0 y 1023 en la salida y en la entrada de 0 a 254, de esta forma es conectada a través del cable de interfaz de Arduino con puerto serie a Unity3D.



Figura 4.16. Tablero de Interconexión.

La interconexión del cableado eléctrico fue detallada en los planos eléctricos ubicados en los anexos en el presente proyecto de titulación.

#### 4.9.1 Diseño del HMI para el control de procesos

A continuación, se presenta en la gráfica (4.17), el diseño del HMI en donde nos permitirá visualizar las variables de proceso, y monitorear el sistema virtual de flujo.

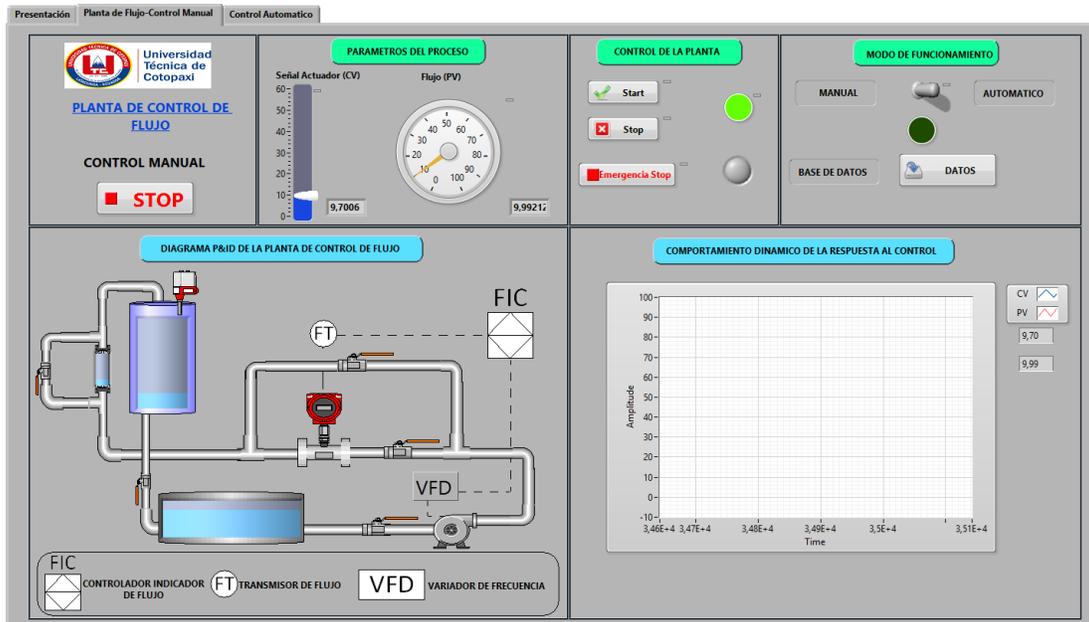


Figura 4.17. Señal de Excitación y respuesta de la planta de Control Manual.

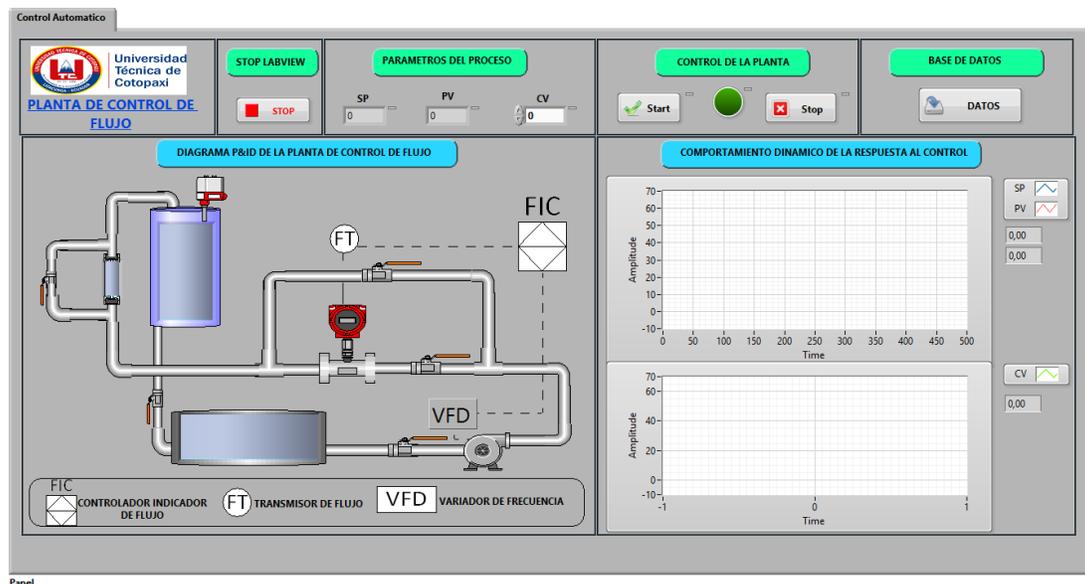


Figura 4.18. Señal de Excitación y respuesta de la planta de Control Automático.

La HMI (Interfaz Humano Máquina) facilita a los estudiantes poder observar cómo se comporta el sistema ante una señal de excitación.

Donde la sintonía del sistema establecida ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), se efectúa la interfaz de visualización en el software de control y monitoreo, el cual accede al envío de datos de entrada (CV) y salida (PV) para evaluar correctamente la función de transferencia del sistema.

#### 4.9.2 Interfaz de desarrollo

Para poder implementar la simulación virtual de la planta de flujo, se requiere de la instalación módulos adicionales en el software de control y monitoreo HMI. En primer lugar, se crea un bucle y un for load el cual nos permite actualizar en un determinado tiempo y seguir en un ciclo infinito, así mismo se crea un bloque el cual esto permita ingresar sus valores tanto como en el numerador y en el denominador, así mismo declarando la función de transferencia para el control en lazo abierto, y los distintos componentes como se puede visualizar en la figura (4.19). Para la dinámica de este proceso se trabaja con las variables correspondientes: Set point (SP), la variable de control (CV), la variable de proceso (PV) y el indicador Waveform tipo chart para poder observar en la simulación la reacción de la gráfica.

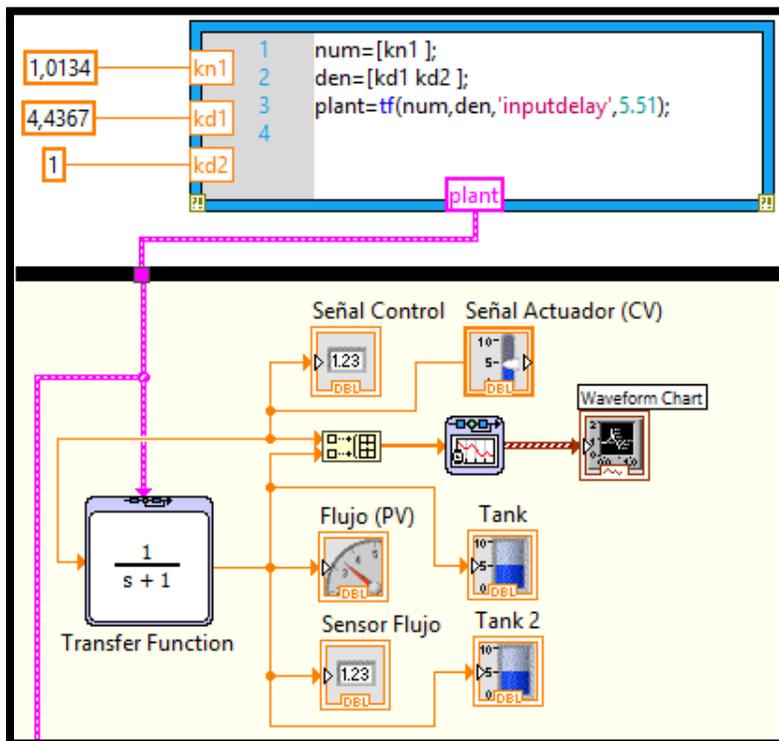


Figura 4.19. Dinámica del Sistema con Control Manual.

Para la dinámica de este proceso se trabaja con su función de transferencia para el control de lazo cerrado, y con las variables correspondientes: Set point (SP), la variable de control (CV),

la variable de proceso (PV) y el Waveform chart de tal forma poder observar en la simulación su respectiva gráfica.

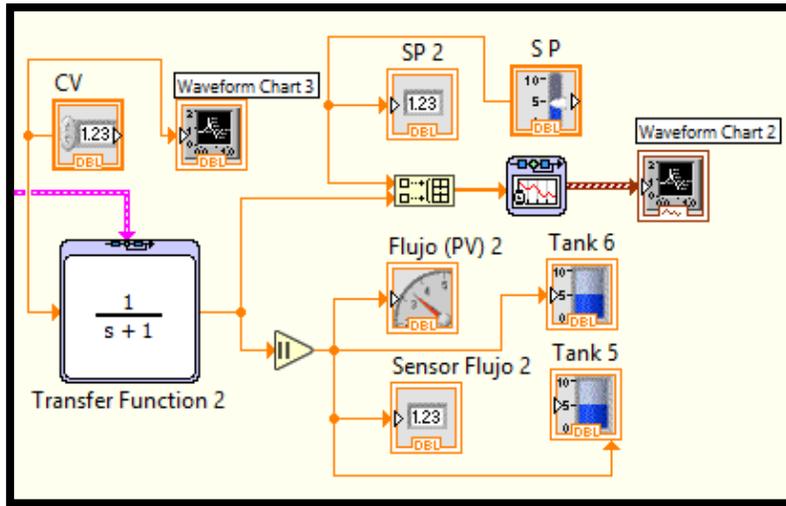


Figura 4.20. Dinámica del Sistema con un control automático.

Para la inicialización del sistema de variables se crea el primer bloque indicando el paro de emergencia tanto para el control manual y el control automático, así mismo mencionar el indicador de inicio de las variables, se coloca el comienzo y la finalización del HMI.

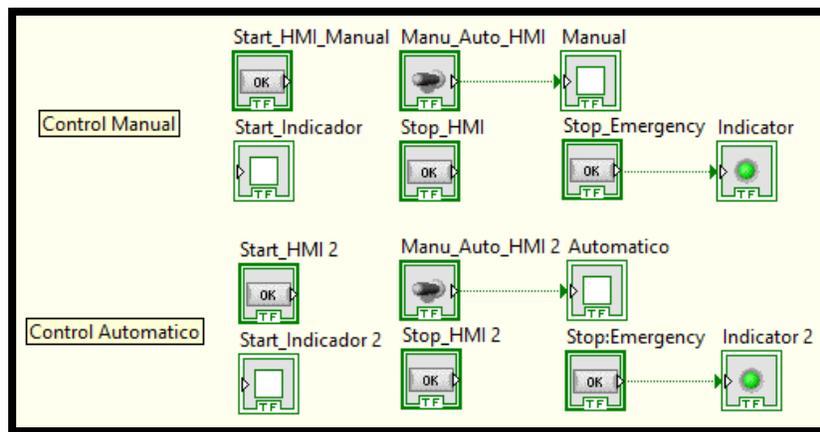


Figura 4.21. Bloques de indicadores principales.

Por ello se crea una estructura y poder lograr guardar los datos que reflejan el sistema a utilizar, si se pone (Verdadero) se guarda directamente y (Falso) no se guarda, de tal manera se crea dos bloques Set Dynamic tanto para las variables del sensor de flujo (PV) y la señal de control (CV) correspondientes, y el bloque Elapsed Time el cual nos permite en cambio permitir escribir en un determinado tiempo (1 segundo) y otro bloque (Write to Measurement

File) donde nos permite guardar las variables en un archivo tipo .xls (Excel) y poder ejecutarlo en panel frontal.

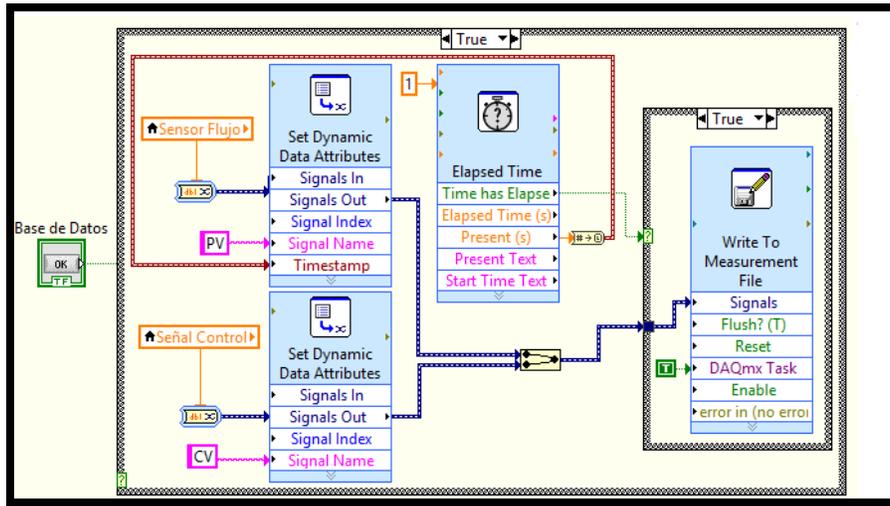


Figura 4.22. Estructura para guardar las variables.

### 4.9.3 Modelo del algoritmo

En primer lugar, se debe elegir la estructura apropiada: P, PI, o PID.

Se debe tener en cuenta que se está trabajando con una función de transferencia la cual representa el comportamiento de la planta real el cual utilizaremos en nuestro control automático.

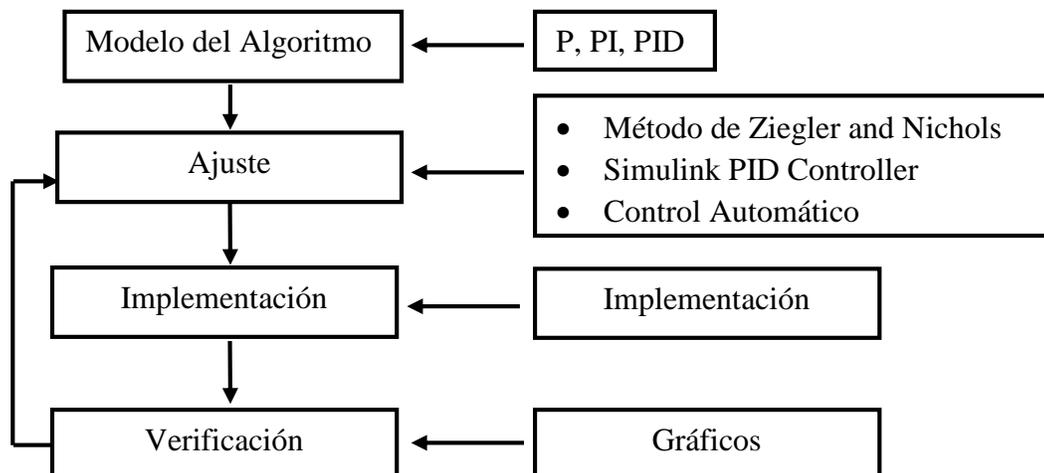


Figura 4.23. Diagrama de flujo para el modelo del PID.

#### 4.10 Diagrama de bloques del sistema de control

La siguiente grafica representa el diagrama de bloques de sistemas de control, donde el bloque “Step” indica la entrada de tipo escalón, el bloque “PID Controller” indica el tipo de controlador a utilizar, este bloque es modificado para los controladores (P, PI, PID) y con esto poder demostrar con cuál de ellos se adquiere el mejor resultado, en el siguiente bloque “Transfer Fcn” se implanta la función de transferencia del sistema de flujo, mientras que en el bloque “Transport Delay” contiene el retardo de tiempo para la sintonización, y por último se añadió los bloques “Scope” que indica la curva obtenida de la variable controlada (Flujo) y “Display” donde representa el valor obtenido de la misma variable.

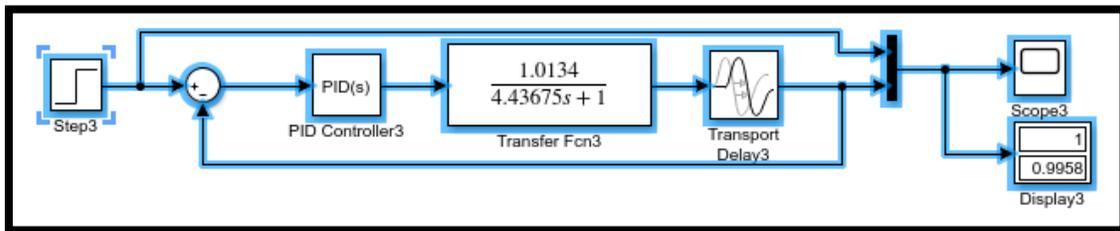


Figura 4.24. Diagrama de bloques del sistema de control.

En el bloque descrito anteriormente se realizará las pruebas de sintonización con el método de Lamda, Cohee Coon, y Ziegler-Nichols y así verificar con cuál de ellos se obtiene la mejor sintonización para el proceso del sistema.

#### 4.11 Método de sintonía Lambda

El modelo de sintonía Lambda es muy similar al de Ziegler-Nichols, donde se utiliza con frecuencia en las industrias de procesos porque trabaja con una acción integral más dinámica y permite corregir de una mejor manera el error

Para el método Lambda y el cálculo de parámetros del PID estableciendo así los valores de,  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , como se muestra en la tabla (4.2)

Tabla 4.2. Tabla del método Lambda.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PID	$\frac{1}{k} \left( \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + 3T} \right)$	$T + \frac{L}{2}$	$\frac{T * L}{L + 2T}$

- **Control PID**

Los parámetros para el controlador PID se muestra en las siguientes ecuaciones.

En la ecuación (4.3) se representa la Ganancia proporcional

$$K_p = \frac{1}{k} \left( \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + 3T} \right) \quad (4.3)$$

$$K_p = \frac{1}{1.0314} \left( \frac{\frac{5.51}{2} + 4.43675}{\frac{5.51}{2} + 3 * 4.43675} \right)$$

$$K_p = \mathbf{0.441}$$

De tal manera se procede a obtener el valor de tiempo de integración (Ti).

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (4.4)$$

$$T_i = 4.43675 + \frac{5.51}{2}$$

$$T_i = \mathbf{7.191}$$

Así mismo se procede a obtener el valor de tiempo derivativo (Td).

$$T_d = \frac{T * L}{L + 2T} \quad (4.5)$$

$$T_d = \frac{4.43675 * 5.51}{5.51 + 2 * 4.43675}$$

$$T_d = \mathbf{1.699}$$

En la ecuación (4.6) se representa la Constante Integral (Ki)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.6)$$

$$K_i = \frac{0.441}{7.191}$$

$$K_i = \mathbf{0.0613}$$

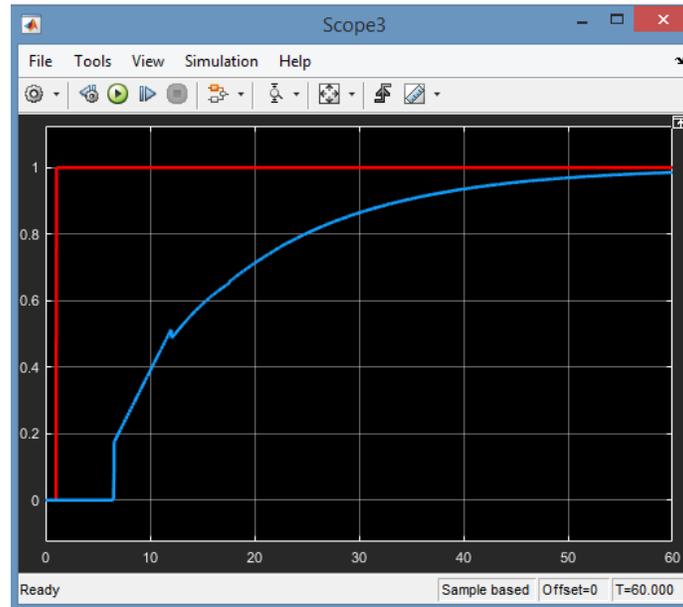
En la ecuación (4.7) se representa la Constante derivativa (Kd)

$$K_d = K_p * T_d \quad (4.7)$$

$$K_d = 0.441 * 1.699$$

$$K_d = 0.7492$$

En la figura (4.25) muestra la representación gráfica al aplicar el método de sintonía Lambda.



**Figura 4.25.** Método de Lambda con control PID.

El método lambda tiende a ser el más efectivo en el sistema de lazo cerrado ya que se puede visualizar que no presenta sobre impulsos sin embargo su tiempo de estabilidad alcanza los 80 segundos y es considerablemente mayor a los otros métodos aplicados.

#### 4.12 Método de Cohen-Coon

Este método de sintonización principalmente se basa en el rechazo de las perturbaciones de carga, y como método de reacción el cual se obtiene directamente una respuesta de la planta al aplicar un escalón unitario, por el cual se caracteriza por tres parámetros ( $K_P$ ,  $L$ ,  $T$ ), de la misma manera se establece una tabla de fórmulas de sintonía donde se expresan basándose en cálculos analíticos.

Para el método de Cohen-Coon y el cálculo de parámetros de P, PI, PID estableciendo así los valores de  $K_P$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , como se muestra en la tabla (4.3)

**Tabla 4.3.** Tabla de Cohen-Coon.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau}}{a}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.9 * (1 + \frac{0.092 * \tau}{1-\tau})}{a}$	$L(\frac{3.3 - 3\tau}{1 + 1.2\tau})$	0
PID	$\frac{1.35 * 1 + (\frac{0.18 * \tau}{1-\tau})}{a}$	$L(\frac{2.5 - 2\tau}{1 - 0.39\tau})$	$L(\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau})$

Donde

$$a = \frac{KL}{T} \quad (4.8)$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} \quad (4.9)$$

Obteniendo los datos correspondientes de  $K = 1.0134$ ,  $L = 5.51$  segundos y  $T = 4.43657$  segundos, los valores de  $a$  y  $\tau$  son:

$$a = 1.258$$

$$\tau = 0.553$$

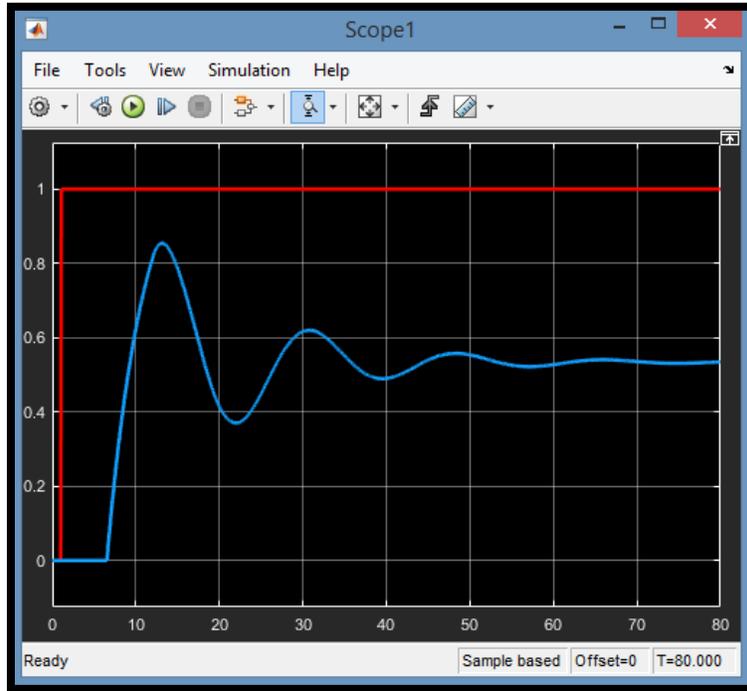
- **Control P**

$$K_p = \frac{1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau}}{a} \quad (4.10)$$

$$K_p = \frac{1 + \frac{0.35 * 0.553}{1 - 0.553}}{1.258}$$

$$K_p = 1.139$$

En la figura (4.26) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Cohen-Coon con un control P.



**Figura 4.26.** Método de Cohen-Coon con control P.

- **Control PI**

En la ecuación (4.11) se representa la Ganancia proporcional.

$$K_p = \frac{0.9 * (1 + \frac{0.092 * \tau}{1 - \tau})}{a} \quad (4.11)$$

$$K_p = \frac{0.9 * (1 + \frac{0.092 * 0.553}{1 - 0.553})}{1.258}$$

$$K_p = \mathbf{0.7968}$$

De tal manera se procede a obtener el valor de tiempo de integración (Ti).

$$T_i = L \left( \frac{3.3 - 3\tau}{1 + 1.2\tau} \right) \quad (4.12)$$

$$T_i = 2.623 \left( \frac{3.3 - 3 * 0.553}{1 + 1.2 * 0.553} \right)$$

$$T_i = \mathbf{5.435}$$

En la ecuación (4.13) se representa la Constante Integral (Ki)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.13)$$

$$K_i = \frac{0.7968}{5.435}$$

$$K_i = 0.1466$$

En la figura (4.27) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Cohen-Coon con un control PI.

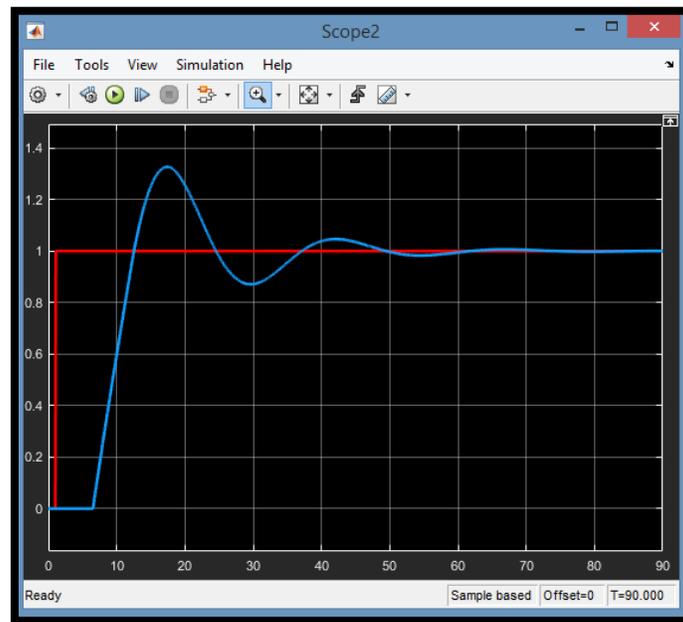


Figura 4.27. Método de Cohen-Coon con control PI.

- **Control PID**

Para el cálculo de parámetros del control PID se determina los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ .

$$K_p = \frac{1.35 * \left( \frac{1+0.18\tau}{1-\tau} \right)}{a} \quad (4.14)$$

$$K_p = \frac{1.35 * \left( \frac{1 + 0.18 * 0.553}{1 - 0.553} \right)}{1.258}$$

$$K_p = 2.6397$$

De tal manera se procede a obtener el valor de tiempo de integración ( $T_i$ ).

$$T_i = L \left( \frac{2.5-2\tau}{1-0.39\tau} \right) \quad (4.15)$$

$$T_i = 5.51 \left( \frac{2.5 - 2 * 0.553}{1 - 0.39 * 0.553} \right)$$

$$T_i = \mathbf{9.682}$$

Así mismo se procede a obtener el valor de tiempo derivativo (Td).

$$T_d = L \left( \frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau} \right) \quad (4.16)$$

$$T_d = 5.51 \left( \frac{0.37 - 0.37 * 0.553}{1 - 0.81 * 0.553} \right)$$

$$T_d = \mathbf{1.596}$$

En la ecuación (4.17) se representa la Constante Integral (Ki)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.17)$$

$$K_i = \frac{2.6397}{9.682}$$

$$K_i = \mathbf{0.2644}$$

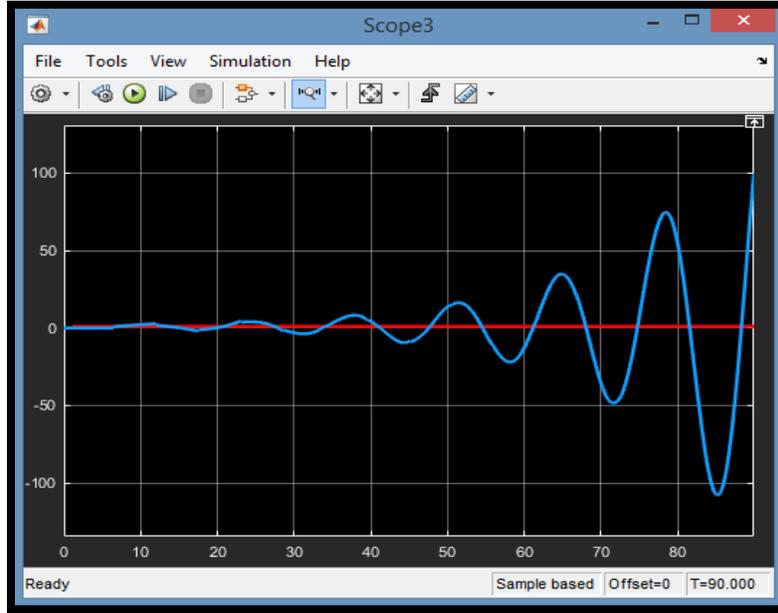
En la ecuación (4.18) se representa la Constante derivativa (Kd)

$$K_d = K_p * T_d \quad (4.18)$$

$$K_d = 2.6397 * 1.596$$

$$K_d = \mathbf{4.2129}$$

En la figura (4.28) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Cohen-Coon con un control PID.



**Figura 4.28.** Método de Cohen-Coon con control PI.

### 4.13 Método de Ziegler and Nichols

En la figura (4.29) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Ziegler and Nichols. Este método se utiliza con un sistema de lazo cerrado, con el fin de que al momento que se aumente la ganancia proporcional del controlador se logre conseguir en la salida una respuesta oscilatoria con una amplitud constante.

Ziegler y Nichols propusieron un cálculo de parámetros del PID en lazo cerrado estableciendo así los valores de,  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , como se muestra en la tabla (4.2)

**Tabla 4.4.** Tabla de fórmulas para Ziegler-Nichols.

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{K * L}$	0	0
PI	$0.9 * \frac{\tau}{K * L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 * \frac{\tau}{K * L}$	$2 * L$	$0.5 * L$

- **Control P**

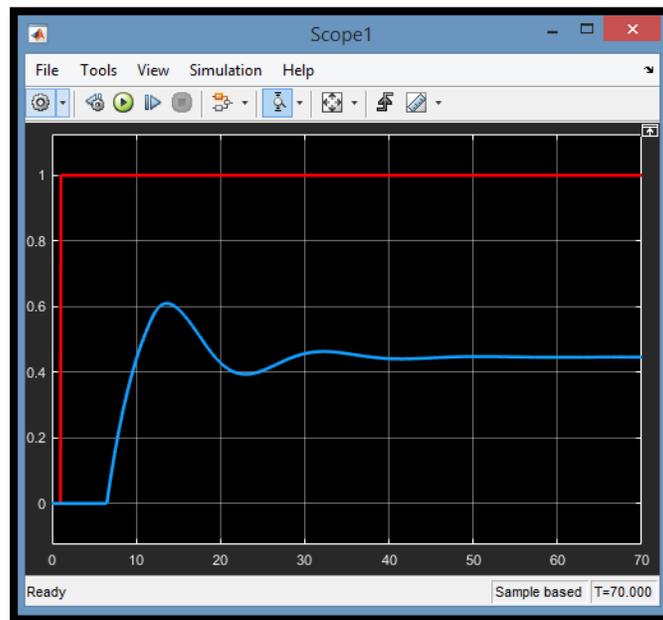
A continuación, se procede a calcular el valor de la Ganancia proporcional  $K_p$ .

$$K_p = \frac{\tau}{K * L} \quad (4.19)$$

$$K_p = \frac{4.4367}{1.0134 * 5.51}$$

$$K_p = 0.7945$$

En la figura (4.29) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Ziegler-Nichols con un control P.



**Figura 4.29.** Método de Ziegler-Nichols con control P.

- **Control PI**

A continuación, se procede a calcular el valor de  $K_p$ , y  $T_i$  para obtener la respuesta del sistema con un controlador PI.

Ganancia proporcional ( $K_p$ )

$$K_p = 0.9 * \frac{\tau}{K * L} \quad (4.20)$$

$$K_p = 0.9 * \frac{4.4367}{1.0134 * 5.51}$$

$$K_p = 0.7151$$

De tal manera se procede a obtener el valor de tiempo de integración (Ti).

$$T_i = \frac{L}{0.3} \tag{4.21}$$

$$T_i = \frac{5.51}{0.3}$$

$$T_i = 18.3666$$

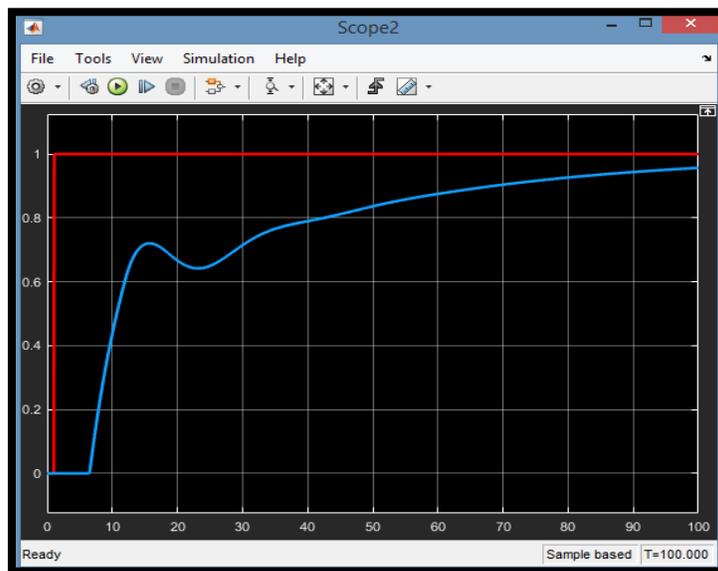
En la ecuación (4.22) se representa la Constante Integral (Ki)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{4.22}$$

$$K_i = \frac{0.7151}{18.3666}$$

$$K_i = 0.03893$$

En la figura (4.30) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Ziegler-Nichols con un control PI.



**Figura 4.30.** Método de Ziegler-Nichols con control PI.

- **Control PID**

Posteriormente obtenido los valores para el control P, PI se procede a obtener valores de  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  con su constante  $K_i$  y  $K_d$  para un control PID.

En la ecuación (4.23) se representa la Ganancia proporcional.

$$K_p = 1.2 * \frac{\tau}{K * L} \quad (4.23)$$

$$K_p = 1.2 * \frac{4.4367}{1.0134 * 5.51}$$

$$\mathbf{K_p = 0.9534}$$

De tal manera se procede a obtener el valor de tiempo de integración ( $T_i$ ).

$$T_i = 2 * L \quad (4.24)$$

$$T_i = 2 * 5.51$$

$$\mathbf{T_i = 11.02}$$

Así mismo se procede a obtener el valor de tiempo derivativo ( $T_d$ ).

$$T_d = 0.5 * L \quad (4.25)$$

$$T_d = 0.5 * 5.51$$

$$\mathbf{T_d = 2.755}$$

En la ecuación (4.26) se representa la Constante Integral ( $K_i$ ).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.26)$$

$$K_i = \frac{0.95347}{11.02}$$

$$\mathbf{K_i = 0.08652}$$

En la ecuación (4.27) se representa la Constante derivativa ( $K_d$ ).

$$K_d = K_p * T_d \quad (4.27)$$

$$K_d = 0.95347 * 2.755$$

$$K_d = 2.62681$$

En la figura (4.31) muestra la representación gráfica al aplicar el método de Ziegler-Nichols con un control PID.

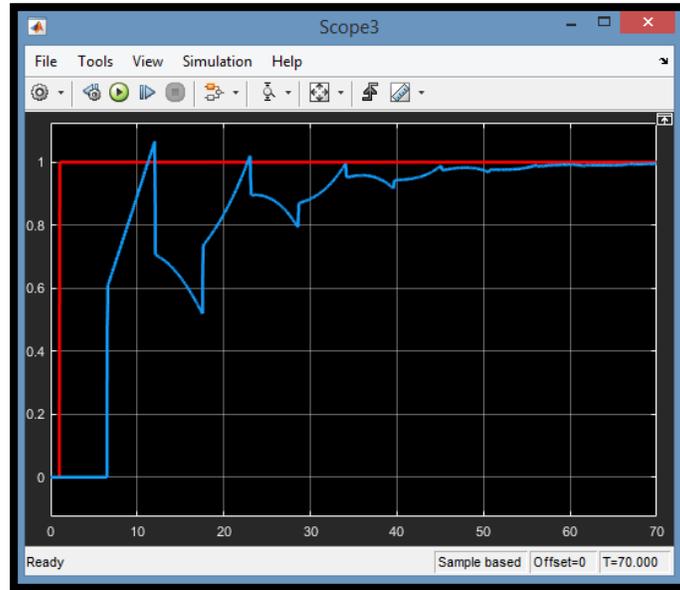


Figura 4.31. Método de Ziegler-Nichols con control PID.

#### 4.14 Programación del PLC para el control de flujo

A continuación, se presenta en la figura (4.32) el Ladder de inicio y paro del sistema a controlar, así mismo se añade un indicador del actuador de proceso y la activación automática del HMI.

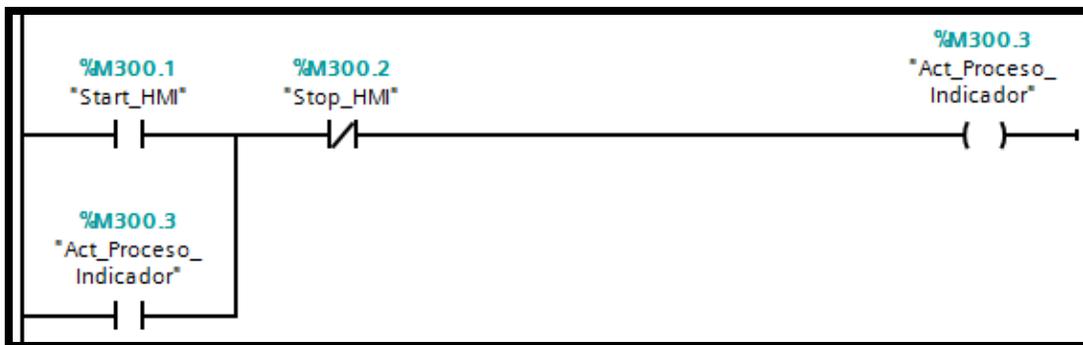
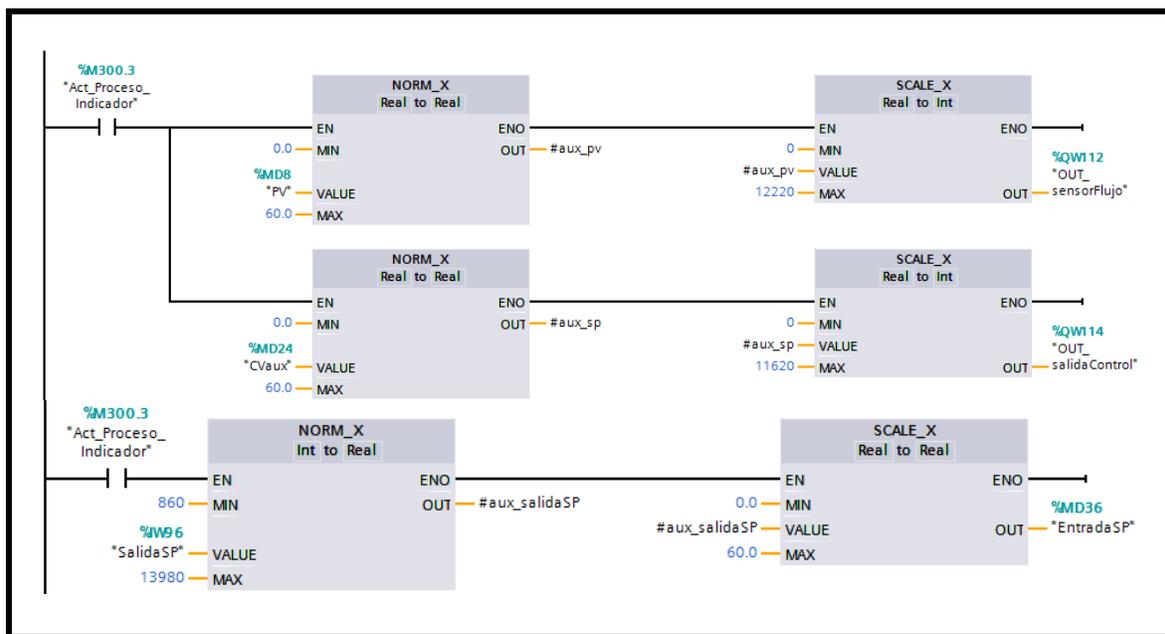


Figura 4.32. Ladder de Control.

Fuente: Software de programación de Siemens.

En el siguiente segmento se muestra el escalamiento de las señales analógicas del sensor de flujo. Además podemos encontrar el bloque NORM\_X y el SCALE\_X que se mencionó anteriormente. En el bloque NORM\_X adquirimos la señal que envía el transmisor de flujo en un rango de 0 a 27.649v que es con el que trabaja el controlador en un escalamiento de 0 a 10v, se debe tomar en cuenta que el sistema de flujo trabaja de 0 a 5v y en el rango que comprende el controlador sería 11.760v. El bloque SCALE\_X será la entrada de la variable de salida del bloque anterior en donde se indica el rango de la señal de oscilación para el control del proceso.

Como se puede observar en la (figura 4.33) tenemos una entrada de la variable de proceso (PV) y el set-point (SP) por el bloque NORM\_X y en la salida se puede observar las mismas variables ya escaladas por el bloque SCALE\_X. También se puede apreciar la entrada del sensor de flujo y un variable de control (CV) por el bloque NORM\_X y en la salida se puede observar las mismas variables ya escaladas por el bloque SCALE\_X.

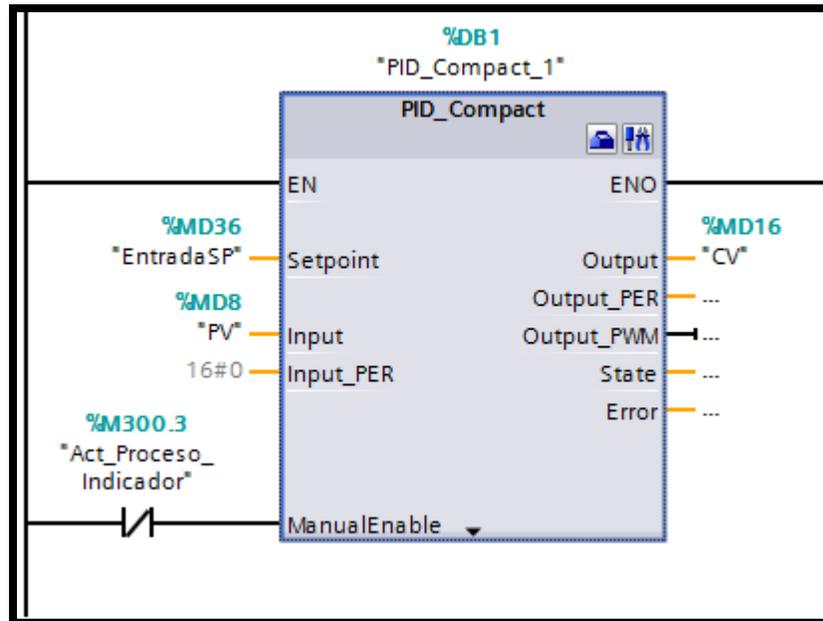


**Figura 4.33.** Ladder de Control.

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Además, se implementa un control PID compact, el cual se declara a la entrada del Set point el valor al que se quiera llegar de forma real definiendo el tag como memoria global y el Input el valor que nos da la planta (PV), así mismo en el Output especificar la salida que

estímule la planta, es decir subir o disminuir la frecuencia del variador para mantener una variable requerida (CV), de tal forma para configuración del PID se define el tipo de controlador que se quiera utilizar, los parámetros de entrada y salida, los límites del valor real en este caso de 0 a 60 y los límites del valor de salida y por último los parámetros del PID: la ganancia proporcional, tiempo de integración, y el tiempo derivativo.



**Figura 4.34.** Control PID Compact.  
**Fuente:** Software de programación de Siemens

#### 4.15 Comunicación serial entre Arduino y Unity3D

La comunicación serial se establece entre la tarjeta Arduino Nano y una computadora personal que ejecute el entorno virtual en Unity3D.

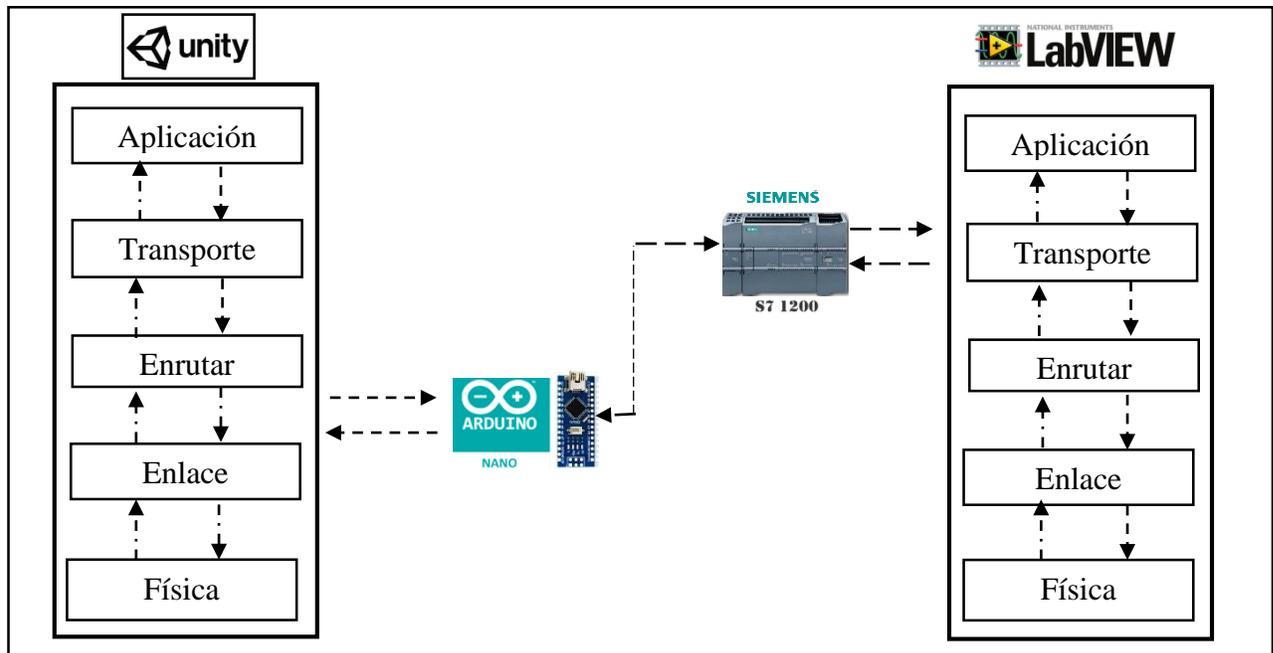
En primer lugar, configuramos el puerto serial, normalmente se hace con el módulo de VISA que es aquel controlador de el puerto de comunicación serial a través del USB en la computadora. Es importante mencionar que para la configuración del VISA es automática, tomando en cuenta que para esta acción debemos generar el controlador para el parámetro “Visa Resource Name” que es el indicador del COM para la interfaz Arduino-Unity3D.

#### 4.16 Interfaz entre el software de monitoreo HMI y Unity3D

Para realizar el intercambio de datos entre el software de monitoreo HMI y Unity3D se ha manejado un protocolo de comunicación TCP/IP con una arquitectura usuario-controlador,

donde el software de monitoreo HMI actuará como controlador y Unity3D como usuario. Este modo de comunicación realiza múltiples intercambios de datos y accede al envío y la adquisición de variables correctas en tiempo real mediante la optimización de códigos para mejorar la operación del sistema.

#### 4.16.1 Comunicación de aplicaciones de PC y módulos físicos



**Figura 4.35.** Intercambio de datos entre módulos físicos y aplicaciones de PC.

Cuando el usuario se conecta al servidor, la transferencia de datos es constante, también se debe mencionar que la conexión se puede ejecutar en la misma computadora o a través de una red de comunicación (LAN). Entre los datos transferidos desde el software de control y monitoreo (HMI) a Unity3D están: el flujo de caudal en la tubería del sistema, nivel del tanque, variable de control, indicadores (alarmas), y un indicador utilizado para de control final del proceso (variador de frecuencia); de igual manera en la transferencia de datos entre el software de programación del PLC S7-1200 y el software de control y monitoreo (HMI) están: las constantes de sintonización del controlador PID, el porcentaje de interferencia y el set-point (en modo de simulación).

Los datos adquiridos en Unity3D son situados ordenadamente en el HMI virtual el cual se ha utilizado para programar algunas animaciones de los elementos de la planta virtual de flujo.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Validación del sistema de control de Flujo

Para validar el funcionamiento del sistema de control de flujo primero se obtuvo el modelo matemático del comportamiento del proceso real, luego se adquiere la función de transferencia y de esta manera se procede a la sintonización del sistema con el método más apropiado, además se describe el diseño del sistema didáctico en un entorno virtual que refleja la planta real desarrollado en Unity3D y se demuestra el funcionamiento completo del sistema y para finalizar se realiza una comparación de variables de control (CV) y de proceso (PV) entre el sistema real y el sistema virtual y por último se demuestra el funcionamiento completo del sistema didáctico virtual.

### 5.2 Función de Transferencia

En la ecuación (5.1) se muestra la función de transferencia adquirida del comportamiento de la planta real, como se puede observar por su estructura es de primer orden con retardo de tiempo.

$$G(s) = \frac{1.0337}{6.2014 s + 1} e^{-2.623 s} \quad (5.1)$$

### 5.3 Control manual del sistema didáctico virtual

Una vez obtenido la función de transferencia con el software MATLAB mediante la herramienta Simulink se diseñó un sistema en lazo abierto más tiempo muerto para la simulación del proceso (figura 5.1).

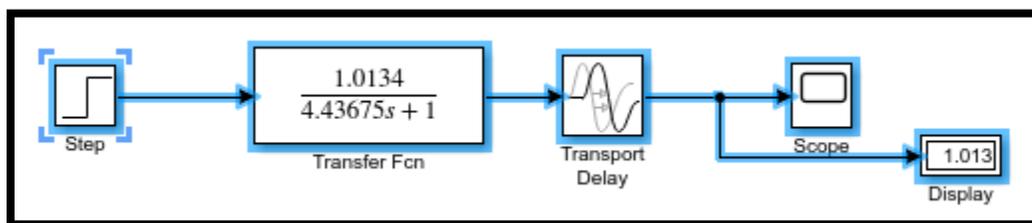


Figura 5.1. Simulación en Lazo Abierto.

Se implanto la función de transferencia en el software de control y se realizó un control manual en lazo abierto del sistema didáctico virtual (figura 5.2) y un HMI para la visualización del proceso.

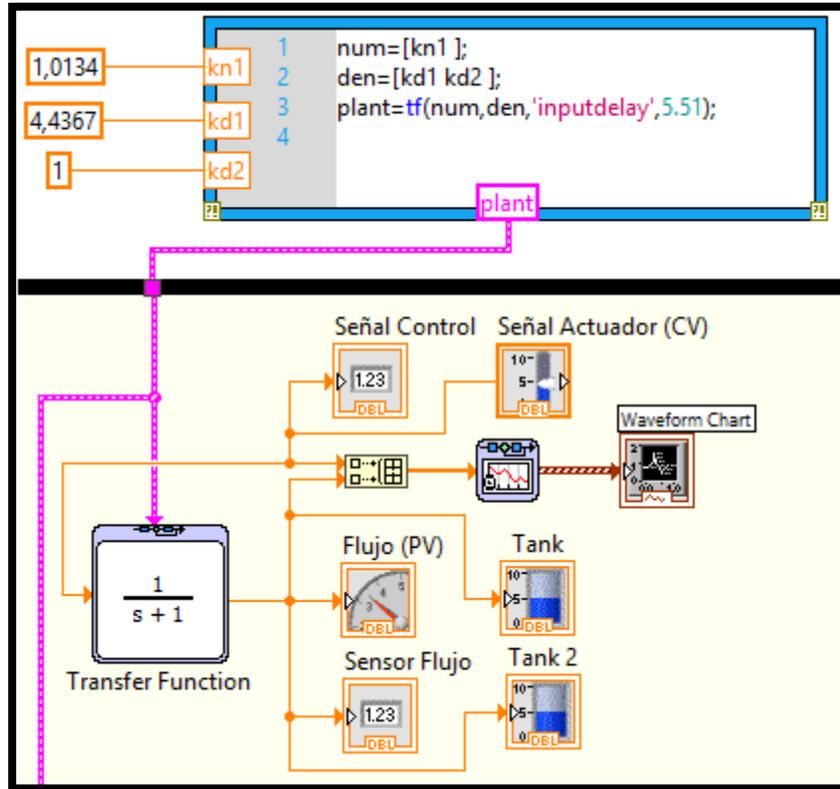
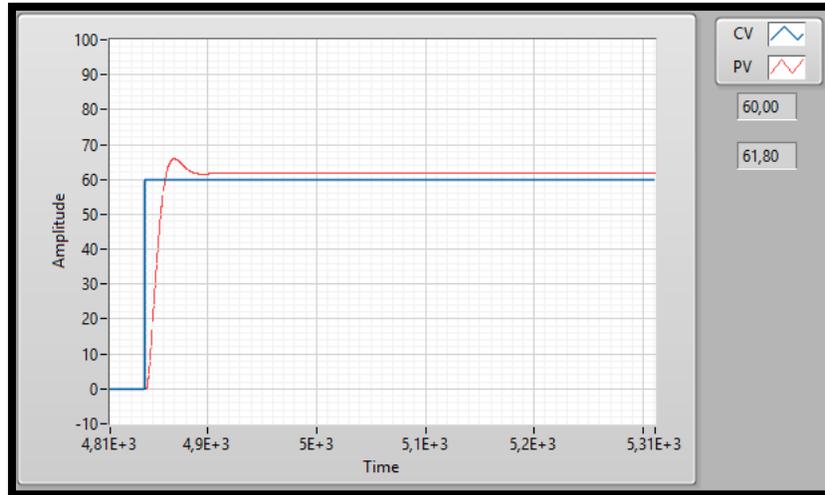


Figura 5.2. Control manual del sistema con la función de transferencia.

En el diseño del HMI se puede visualizar la variable de control con una amplitud estable de 60 y la variable de proceso con un sobreimpulso de 66.5 (pico) y se estabiliza a una amplitud de 61.80 donde se puede visualizar un margen de error del 3%, (figura 5.3).

$$e = \frac{61.80 - 60}{61.80} * 100 \tag{5.2}$$

$$e = 3\%$$

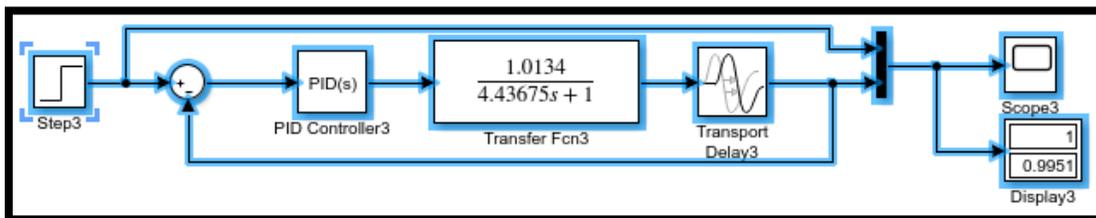


**Figura 5.3.** Comportamiento dinámico de la respuesta al control manual.

#### 5.4 Control automático del sistema didáctico virtual

Después de realizar las pruebas necesarias en el control manual del sistema en lazo abierto y no obtener resultados óptimos, se procede a diseñar un control automático en lazo cerrado para eliminar el sobreimpulso y disminuir el rango de error del sistema como se observa en la (figura 5.4).

Para la sintonización del sistema de Control de Flujo se aplicaron los métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon y Lambda y mediante las pruebas experimentales realizadas se definió que el método de Ziegler-Nichols es el más apropiado para sintonizar el sistema de control de flujo en lazo cerrado que se realizó en el sistema de control automático.



**Figura 5.4.** Simulación en lazo cerrado con retroalimentación unitaria.

De esta manera utilizando el software MATLAB mediante la herramienta Simulink se diseñó un sistema de lazo cerrado con retroalimentación unitaria para poder optimizar el comportamiento del sistema didáctico de control de flujo, donde se agregará la constante proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativa ( $K_d$ ) del controlador mediante el método de sintonización de Ziegler-Nichols donde se pondrá a prueba los controladores.

## 5.4.1 Sintonización del sistema con el método de Ziegler-Nichols

### 5.4.1.1 Control P

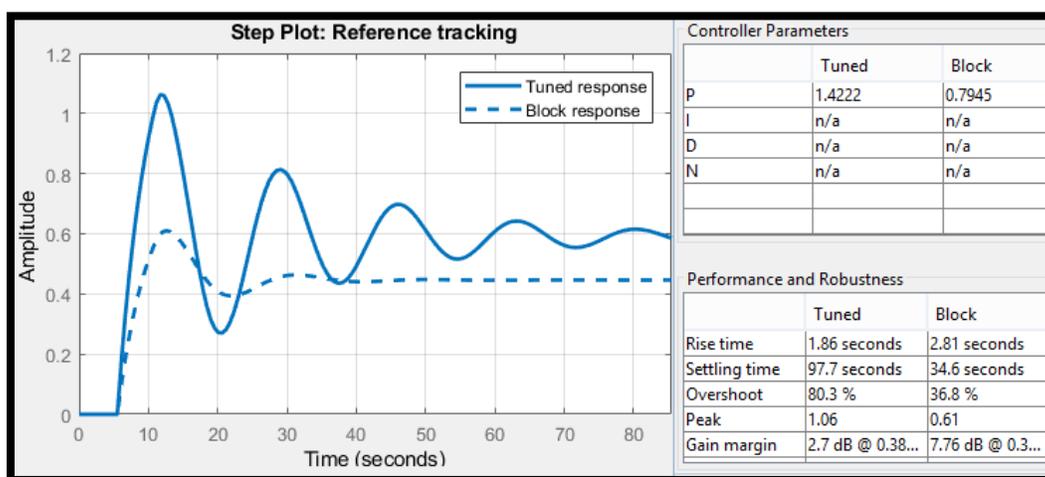
Para realizar la simulación del proceso cambiamos el bloque “PID Controller” y optamos por la opción controlador P, después ingresamos la constante  $K_p$  de la (tabla 5.1) y procedemos a simular el sistema, se debe tomar en cuenta que en este control solo operará la parte proporcional del controlador.

**Tabla 5.1.** Constantes del controlador PI.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	0.7945	$\infty$	0

Según el resultado obtenido en la (figura 5.5) se observa que en los primeros segundos de la simulación existe sobreimpulsos de la variable de flujo y esta tiende a estabilizarse en la amplitud de 0.6 en un lapso de 90 segundos, con la respuesta generada se llega a la conclusión que se debe añadir un controlador de acción integral para disminuir el sobreimpulso y eliminar el error.

En la (figura 5.5) se puede identificar la diferencia entre la variable de control y la variable de proceso con la sintonía de Ziegler-Nichols con un controlador P.



**Figura 5.5.** Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control P.

### 5.4.1.2 Control PI

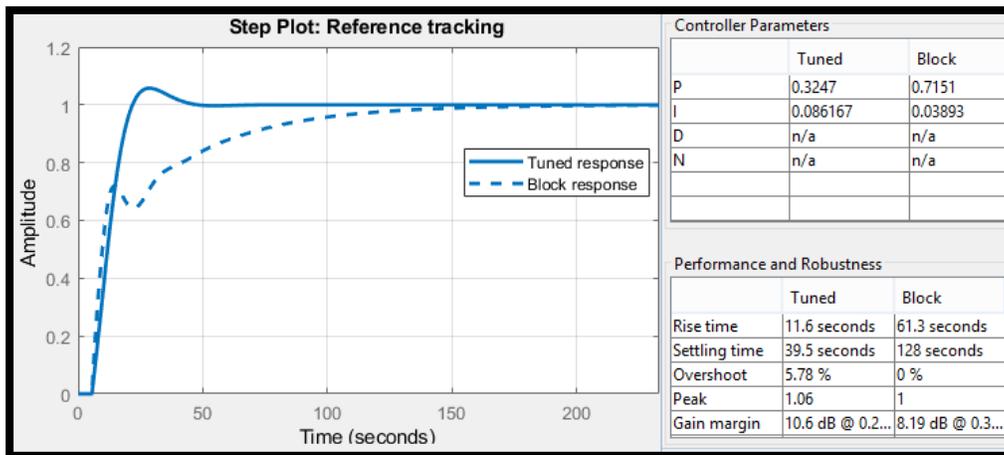
Se ingresa nuevamente al bloque “PID Controller” y optamos por la opción PI, después ingresamos la constante proporcional ( $K_p$ ) y la constante integral ( $K_i$ ) de la (tabla 5.2) y procedemos a simular el sistema. Se debe tomar en cuenta que en este control no operará la parte derivativa del controlador.

**Tabla 5.2.** Constantes del controlador PI.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PI	0.7151	18.3666	0
Controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PI	0.7151	0.03893	0

Según el resultado obtenido se observa que disminuyo la amplitud de los sobreimpulsos de la variable de flujo y esta tiene a estabilizarse en la amplitud de 1.0 que es la requerida en un lapso de 150 segundos, Sin embargo, se debe regular la constante proporcional para eliminar los sobreimpulsos y así obtener el objetivo planteado para satisfacer los requerimientos.

En la (figura 5.6) se puede identificar la diferencia entre la variable de control y la variable de proceso con la sintonía de Ziegler-Nichols con un controlador PI.



**Figura 5.6.** Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control PI.

### 5.4.1.3 Control PID

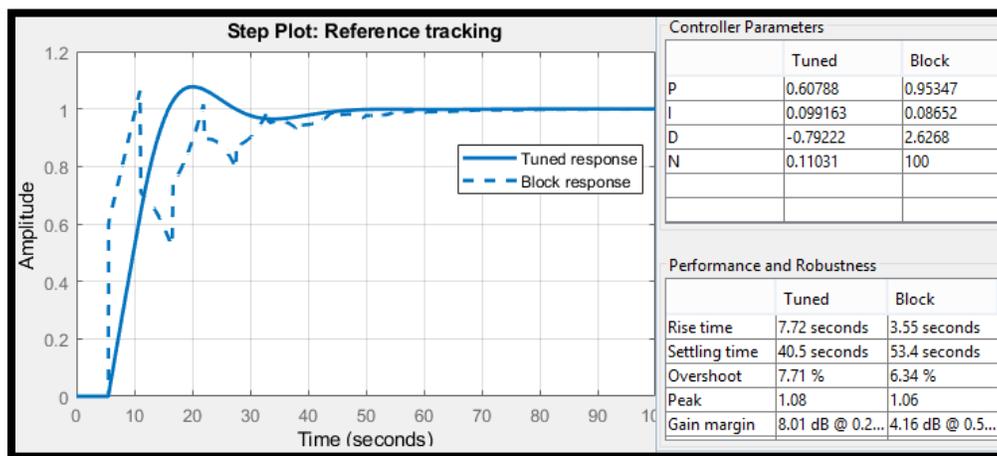
Por último, nos dirigimos al bloque “PID Controller” y optamos por la opción controlador PID, después ingresamos la constante proporcional ( $K_p$ ), la constante integral ( $K_i$ ) y la constante derivativa ( $K_d$ ) de la (tabla 5.3); una vez obtenido los valores procedemos a simular el sistema.

**Tabla 5.3.** Constantes del controlador PID.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PID	0.95347	11.02	2.755
Controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PID	0.95347	0.08652	2.62681

Según el resultado obtenido se observa que en los primeros 40 segundos la curva pierde total inestabilidad, de la misma manera se puede apreciar que aumenta el sobreimpulso considerablemente. Por el cual se define que el control PID no es apto para ser utilizado en el proceso del sistema virtual.

En la (figura 5.7) se puede identificar la diferencia entre la variable de control y la variable de proceso con la sintonía de Ziegler-Nichols con un controlador PID.



**Figura 5.7.** Asimilación de las variables (CV) y (PV) de un control PID.

### 5.4.2 Regulación del control PI

Mediante las simulaciones ejecutadas con los tres tipos de controladores (P, PI, PID) se pudo definir que la curva más aproximada a la anhelada es la del controlador PI; los parámetros obtenidos fueron bajo las condiciones del método Ziegler-Nichols en Lazo Cerrado por el cual estos deben ser ajustados hasta conseguir una curva equivalente en un tiempo mínimo. Con los valores obtenidos anteriormente regulamos la constante proporcional para eliminar los sobreimpulsos de la misma manera llegar a la señal de referencia en un tiempo igual o menor al planteado.

$$K_p = 0.7151 * 0.5 \quad (5.31)$$

$$K_p = 0.35755$$

$$K_i = 0.03893 * 1.7 \quad (5.32)$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (5.33)$$

$$T_i = \frac{0.35755}{0.06618}$$

$$T_i = 5.4026$$

**Tabla 5.4.** Constantes reguladas del controlador PI.

<b>Controlador</b>	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>PI</b>	0.35755	5.4026	0
	<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
<b>PI</b>	0.35755	0.06618	0

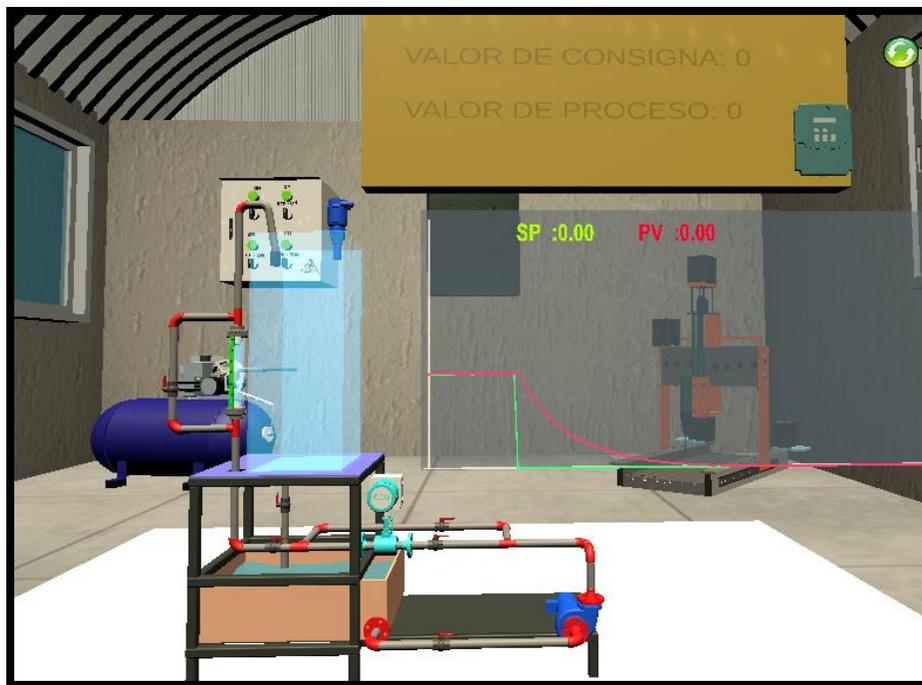
Según el resultado obtenido se observa que se eliminó completamente los sobreimpulsos, y se puede apreciar que la variable de proceso alcanza la señal de referencia en un tiempo igual al propuesto el cual llega a cumplir con el objetivo planteado, también se puede definir que



Para la simulación del proceso del sistema didáctico virtual se realiza un intercambio de datos entre el software de monitoreo del proceso (HMI), el software de programación del PLC (comunicación NI OPC Server) y el entorno virtual en Unity3D en donde se realizó el diseño y programación de interfaces en cada uno de ellos, con diferentes métodos de conexión entre sí, mediante una comunicación TCP/IP.

El sistema didáctico virtual es un circuito cerrado de agua que consta de una bomba el cual transporta líquido desde el tanque de reserva al tanque principal que es comandada por un variador de frecuencia que proporciona el flujo requerido al control, también consta de un sensor de flujo y un rotámetro q nos permite realizar mediciones de caudal de acuerdo a la variación de velocidad.

El en el siguiente grafico se puede visualizar el funcionamiento del sistema del sistema didáctico virtual.

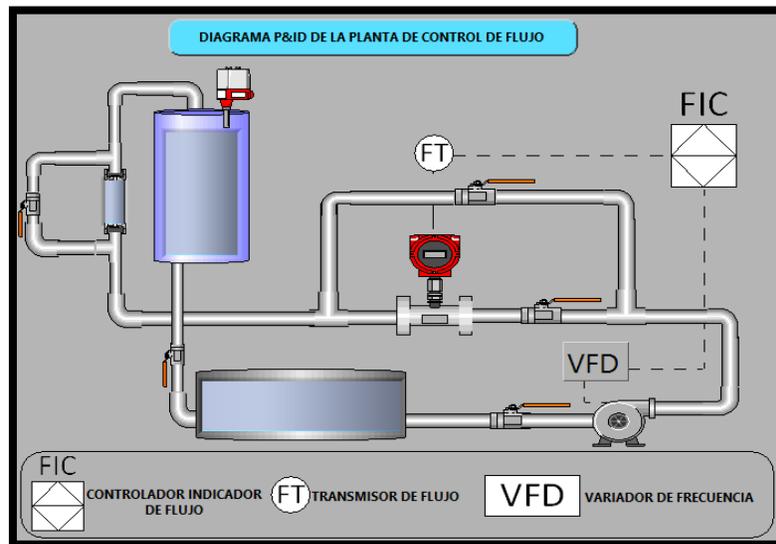


**Figura 5.10.** Planta virtual en Unity3D.

#### **5.4.4 Diagrama PID del sistema**

En el diagrama PID se puede observar los instrumentos de medición y flujo y los equipos y materiales utilizados.

De esta manera se puede apreciar como circula el fluido del tanque secundario al tanque principal, el cual transita por medio de un sensor de flujo de turbina y un rotámetro que son utilizados para la medición de flujo en l/min según la variación de velocidad (VFD) comandada mediante un control indicador de flujo (FIC).



**Figura 5.11.** Diagrama PID del control de flujo.

#### 5.4.5 Simulación del proceso en realidad virtual

El sistema virtual de control de flujo simula el funcionamiento de la planta real existente en el laboratorio donde los datos del sistema didáctico son recibidos desde el software de monitoreo en el cual se ha diseñado un panel de operación HMI para la visualización y control del proceso, estos datos son obtenidos desde el PLC S7-1200 mediante una comunicación NI OPC\_Server, también se creó un bloque programado para una comunicación TCP/IP con Unity3D.

En la siguiente figura se observa todo el proceso del sistema didáctico virtual en los diferentes transmisores virtuales que emulan el funcionamiento de la planta real donde también se puede apreciar una transmisión de datos con un Set-Point de 60 de amplitud con un tiempo de estabilidad de 65 segundos.

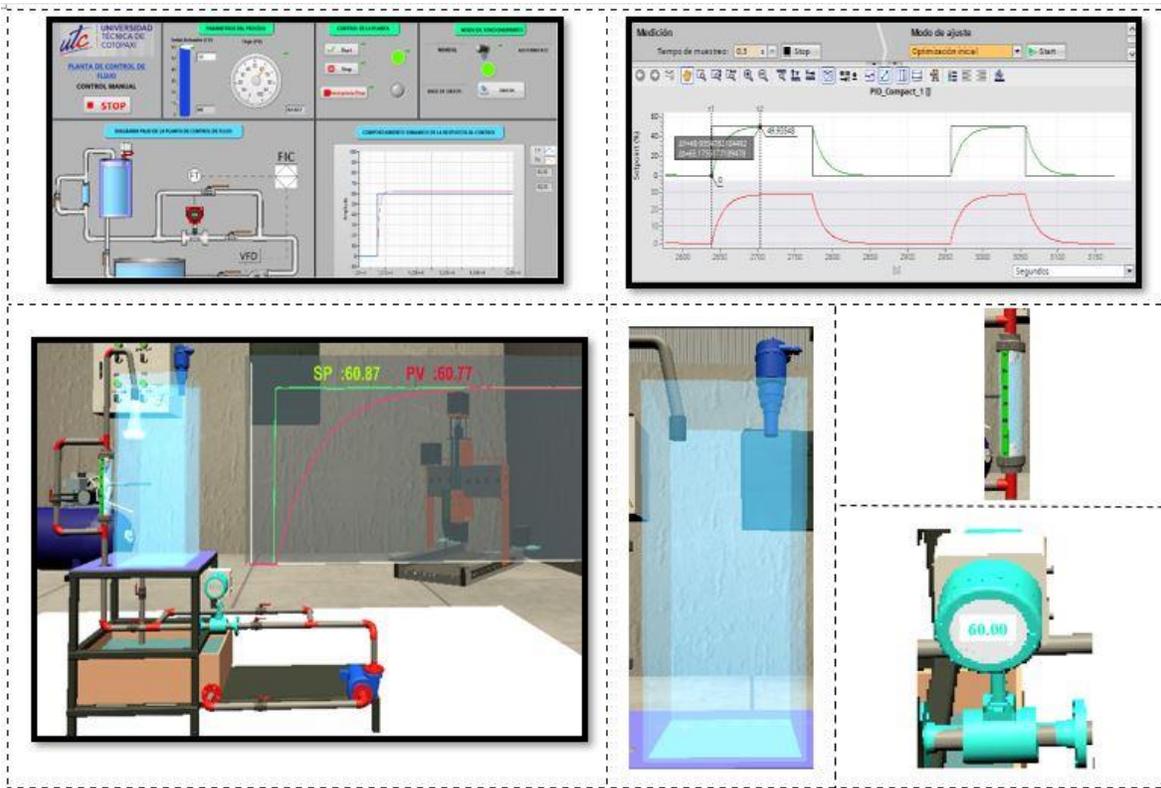


Figura 5.12. Simulación del proceso en un entorno virtual.

#### 5.4.6 Medición y Comparación de variables de flujo entre el sistema real y el virtual (manual)

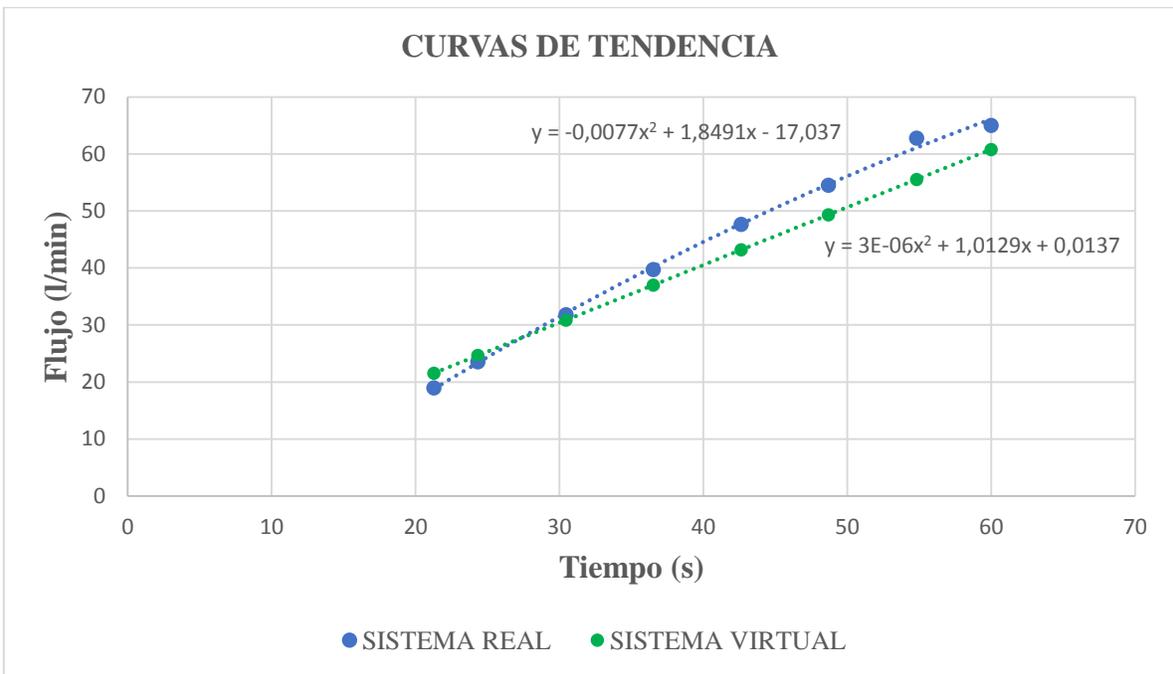
Con las mediciones de flujo y voltaje realizadas en el sistema real y el sistema virtual con un control manual virtual se puede observar la diferencia entre los dos sistemas, también se puede apreciar que el flujo de los dos sistemas presenta un rango de error.

Tabla 5.5. Datos de medición de flujo 1.

Sistema real			Sistema virtual (manual)		
<i>Frecuencia</i> <i>(Hz)</i>	<i>Flujo</i> <i>(l/min)</i>	<i>Voltaje (v)</i>	<i>Frecuencia</i> <i>(Hz)</i>	<i>Flujo</i> <i>(l/min)</i>	<i>Voltaje (v)</i>
0	0.00	0	0	0	0
21.28	19	2	21.28	21.57	1.59
24.34	23.56	2.25	24.34	24.67	1.81
30.46	31.84	2.7	30.46	30.87	2.27
36.52	39.73	3.1	36.52	37.01	2.72

42.64	47.67	3.6	42.64	43.21	3.18
48.7	54.56	3.9	48.7	49.35	3.63
54.82	62.81	4.44	54.82	55.55	4.09
60	65	4.56	60	60.8	4.47

Con los datos obtenidos de medición de las variables de flujo de los sistemas antes mencionados mediante el software de cálculo Excel se graficó las curvas de comportamiento de las variables de flujo, donde se puede observar la diferencia y el rango de error entre curvas en la siguiente gráfica propuesta.



**Figura 5.13.** Rango de error entre sistemas 1.

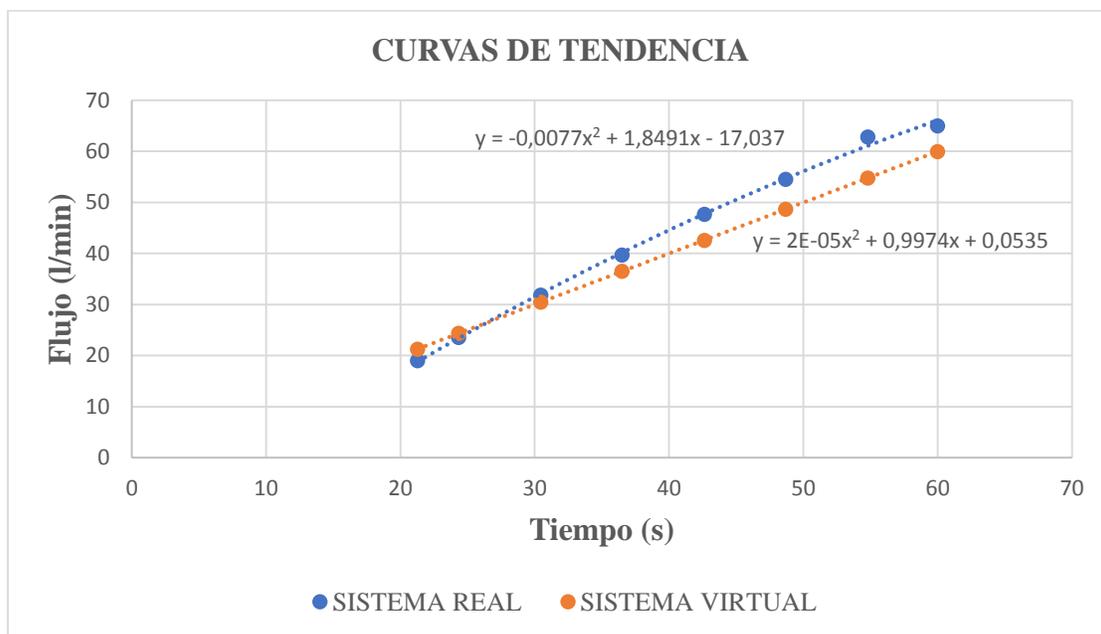
#### 5.4.7 Medición y Comparación de variables de flujo entre el sistema real y el virtual (automático)

Con los datos de medición de flujo antes obtenidos se realizó la comparación entre variables y se puede observar que hay una diferencia menor del comportamiento de flujo entre los sistemas.

**Tabla 5.6.** Datos de medición de flujo 2.

Sistema real			Sistema virtual (automático)		
<i>Frecuencia</i> (Hz)	<i>Flujo</i> (l/min)	<i>Voltaje (v)</i>	<i>Frecuencia</i> (Hz)	<i>Flujo</i> (l/min)	<i>Voltaje (v)</i>
0	0.00	0	0	0	0
21.28	19	2	21.28	21.28	1.56
24.34	23.56	2.25	24.34	24.34	1.79
30.46	31.84	2.7	30.46	30.48	2.24
36.52	39.73	3.1	36.52	36.51	2.69
42.64	47.67	3.6	42.64	42.6	3.13
48.7	54.56	3.9	48.7	48.67	3.58
54.82	62.81	4.44	54.82	54.81	4.03
60	65	4.56	60	59.97	4.42

De igual forma se graficó las curvas de comportamiento de las variables de flujo, donde se puede observar que el rango de error entre la curva real y la de control automático disminuye como se visualiza en la siguiente gráfica por lo que se concluye que el sistema automático es el más adecuado para el control de flujo del sistema virtual.



**Figura 5.14.** Rango de error entre sistemas 2.

## 6. PRESUPUESTO

A continuación, se detalla el análisis de costo de los materiales durante la elaboración del proyecto con el fin de determinar el costo beneficio del mismo.

**Tabla 6.1.** Costo de materiales locales.

ITEM	CANTIDAD	VALOR UNIT (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Arduino Nano	1	9,00	9,00
Sistema de marcaje rapido	1	5,70	5,70
Caja de Acrílico 20x20x7,5	1	20,00	20,00
Cabe Ethernet	1	4,50	4,50
Cable arduino hembra	1	4,50	4,50
Bananas plugs macho A/R	25	0,40	10,00
Jack banana hembra	10	0,40	4,00
Módulo I2c Conversor Digital Análogo Dac Mcp 4725	2	6,80	13,60
Borneras de 2 terminales	5	0,45	2,25
Cable de control #18 (25 metros)	25	0,25	6,25
Funda de amarras plásticas de 10 cm	1	3,65	3,65
TOTAL			\$ 83,45

### 6.1 Costo de horas de ingeniería

Con el diseño concluido del sistema didáctico virtual, el cual se aprovecharon varias horas en el diseño, en el tiempo de realización de pruebas y corrección de errores. De tal manera que el costo de la hora de trabajo según el salario mínimo publicado el 1 de enero de 2020 es de \$440,17 (anexo 1), así mismo tomando en cuenta el Código de Trabajo para su respectivo análisis se considera que se debe trabajar 40 horas durante toda la semana.

# HORAS = 40 horas \* 4 semanas

# HORAS = 160 horas al mes

$$\text{Costo} = \frac{440,17}{160} = \$ 2.75 \text{ la hora}$$

**Tabla 6.2.** Costo de diseño de Ingeniería.

# DE HORAS	DESCRIPCION	VALOR UNIT (\$)	VALOR TOTAL (\$)
80	Diseño del sistema virtual en Unity3D	2.75	220.00
30	Diseño del HMI	2.75	82.50
60	Programación	2.75	165.00
40	Pruebas de funcionamiento	2.75	110.00
TOTAL			\$ 577.50

### 6.1.1 Gastos directos totales

**Tabla 6.3.** Gastos directos totales

GASTOS DIRECTOS	COSTO (\$)
Elementos locales	83,45
TOTAL	83,45

### 6.1.2 Gastos indirectos totales

**Tabla 6.4.** Gastos indirectos totales

GASTOS INDIRECTOS	COSTO (\$)
Diseño de Ingeniería	577.50
TOTAL	577.50

El costo del proyecto de titulación en materiales locales fue de \$ 83,45, de igual manera se realizó el cálculo de la mano de obra que es de \$577.50, además se menciona la suma final

tanto de los materiales y el costo de diseño de ingeniería que es de \$ 660.95, en definitiva el presente sistema didáctico brinda los mismos beneficios de una planta real para realizar prácticas con un presupuesto ideal, por el cual es necesario mencionar que los sistemas virtuales no tienden a realizar mantenimiento y no sufrir algún daño o avería, en cambio los módulos físicos tienden a deteriorarse con el tiempo por el cual es necesario mantenimiento preventivo para que se mantenga en buenas condiciones para la realización de prácticas.

## **6.2 Análisis de Impactos**

### **6.2.1 Impacto práctico**

El presente proyecto de titulación desarrollado en este ciclo, obtiene cierta información de gran importancia para la enseñanza hacia los estudiantes que están tanto empezando y para los que están en proceso de estudio de la Carrera de Ingeniería Electromecánica que se relaciona con elementos de flujo, entornos virtuales, diagramas esquemáticos, bloques de control, entre otros.

### **6.2.2 Impacto tecnológico**

El proyecto “Diseño de un sistema didáctico virtual de control de flujo para el aprendizaje en el laboratorio de investigación de Automatización y Control”, se enfoca en facilitar una nueva herramienta de aprendizaje tanto a los maestros como estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica, con el fin de que los eduquen con equipos similares a los que existen dentro del campo profesional.

El proyecto busca en proporcionar una herramienta de enseñanza-aprendizaje con un sistema dinámico y de fácil utilización a los equipos y programaciones utilizados durante el proceso para que la manipulación sea la correcta. De tal forma para complementar y buscar mejores resultados de este sistema se ha permitido proporcionar las guías técnicas de laboratorio y la documentación pertinente de operación.

### **6.2.3 Beneficiarios**

Los principales beneficiarios serán los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica que podrán contar con un sistema didáctico virtual, con el fin que les permita conocer y configurar algunos de los dispositivos que se encuentran a nivel industrial,

mejorando su capacidad de respuesta frente a situaciones que tengan similitud con las que se podrían plantear en las prácticas de laboratorio.

Por otro lado, el segundo beneficiario es la Universidad Técnica de Cotopaxi ya que demuestra que es un centro educativo de alta calidad y con excelente proyección académica, ya que día a día forman profesionales experimentados y capacitados para desenvolverse eficazmente en el campo laboral.

## 7. CONCLUSIONES

- El diseño del sistema didáctico, utilizando la realidad virtual con el comportamiento dinámico de control de procesos de la planta real tomando como base su funcionamiento, las características de los elementos que lo conforman se determinó los métodos para la obtención del modelo matemático, con el fin de proporcionar a los estudiantes una aproximación a un sistema de control que permite una preparación continua y realista sin contar con una planta física.
- El sistema virtual fue diseñado con una programación individual efectuando animaciones de la planta para brindar realismo y transparencia del proceso en cuanto que el panel operador HMI para el control y monitoreo se realizó de una forma ordenada y clara la cual abarca las variables relevantes del proceso y asimila a un panel táctil (touch-panel) utilizados frecuentemente a nivel industrial.
- Se efectuó un control automático PID en el software de programación del PLC S7-1200 para eliminar el error y el sobreimpulso y mantener la variable controlada cerca al punto de consigna de esta manera se alcanzó con los parámetros establecidos para el control del sistema y mediante variables de entrada introducidas en el software de control y monitoreo se obtuvo la respuesta experimental esperada que se refleja en el entorno virtual Unity3D.
- El sistema didáctico virtual de control de flujo otorgará un método de enseñanza-aprendizaje de manera eficaz en el control de procesos, donde se efectuará las temáticas referentes al ámbito de la carrera de Ingeniería Electromecánica. Asimismo, en el ámbito educativo la realidad virtual ha generado un alto impacto

a los estudiantes, por ende, este sistema es factible para su aplicación en la educación de ingeniería.

## 8. RECOMENDACIONES

- Para que el sistema didáctico virtual obtenga un desempeño óptimo es necesario adquirir una PC de alta capacidad que soporten todos los programas utilizados para el correcto funcionamiento del sistema.
- Para realizar prácticas en el sistema virtual se debe tomar en cuenta las guías de prácticas del laboratorio, en donde se indica la forma correcta de conexión de los tableros y de esta manera se puede evitar la avería de los componentes que interactúan en la conexión.
- Es necesario verificar que el sistema esté en comunicación con todas las plataformas virtuales utilizadas entre sí para la simulación del proceso de lo contrario no se podrá realizar las simulaciones del sistema.
- Para la realización de las simulaciones con las variables de flujo se debe tomar en cuenta que este colocada la correcta función de transferencia del sistema y los correctos parámetros de sintonía para obtener las curvas de las variables de flujo ideales del sistema.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. AG, Level measurement guide: for complete level solutions, Alemania, 1847.
- [2] J. C. Garzón y N. Mora, “HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA EL CONTROL DE LOS PROCESOS PRESIÓN, CAUDAL Y NIVEL, MEDIANTE EL SISTEMA EMBEBIDO MY RIO A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS”, Latacunga, 2018.
- [3] V. Paul, 2012. [En línea]. Available: file:///C:/Users/USER/Downloads/CD-4427.pdf. [Último acceso: Mayo 2012].
- [4] G. Santiago, «Diseño e implementación del sistema de control y monitoreo de nivel y flujo de agua potable,» Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/10831/T-ESPE-049189.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [5] M. Gutiérrez y S. Iturralde, Fundamentos Basicos de Instrumentación y Control., Ecuador: Fiat Lux, 2017.
- [6] L. Reinier y F. Hernández, «Sistema de Monitoreo de Nivel de Líquido en Grandes Depósitos,» *SCIELO*, vol. 24 , nº 1, 2019.
- [7] C. Peñaranda y S. Reinaldo, Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques., Bucaramanga: Díaz de Santos, 2014.
- [8] P. Said, Instrumentación y actualización de un banco de pruebas para las materias de Instrumentación y Dinámica de procesos., México: Cd. Mx, 2018.
- [9] S. Jeickson, «slideshare,» Enero 2017. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/JeicksonSulbaran/introduccion-a-los-sistemas-de-control-y-sus-elementos-71074784>.
- [10] w. pinilla, «Ingeniería Mecafenix,» 13 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sistema-de-control/>.
- [11] G. Altamirano, «TECNOLOGÍA DE CONTROL,» 25 04 2016. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/tecnologiadecontrol2016/home>.
- [12] D. Salvetti, «Electrónica Industrial,» 23 05 2012. [En línea]. Available: <http://eet602ei.blogspot.com/2012/05/sistemas-de-control-lazo-abiertocerrado.html>.
- [13] D. Ramirez y E. Juliana, «Overview,» 9 Mayo 2012. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/4192674/FUNDAMENTOS\\_DE\\_FLUIDOS\\_Y\\_TERMO](https://www.academia.edu/4192674/FUNDAMENTOS_DE_FLUIDOS_Y_TERMO)

DIN%C3%81MICA\_DEPARTAMENTO\_DE\_CIENCIAS\_B%C3%81SICAS\_A\_Hueco\_Piso\_Vox\_RREESSUULLTTAADDOS\_DDEE\_LLAASS\_TTAABBLLAASS\_PPOORR\_MMEEDDIIOO\_DDEE\_LLAASS\_EECCUUAACCIIIONNEES\_S\_AANNTTEERRIIOORREESS.

- [14] T. Susana, «SENSORES DE FLUJO, PRINCIPIOS DE MEDICIÓN, EL ABC DE LA AUTOMATIZACION,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sensores-de-flujo.pdf>.
- [15] M. D. C. E. INNOVACIÓN, «IGME,» INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA, [En línea]. Available: [https://www.igme.es/ZonaInfantil/MateDivul/guia\\_didactica/pdf\\_carteles/cartel4/CARTEL%204\\_4-4.pdf](https://www.igme.es/ZonaInfantil/MateDivul/guia_didactica/pdf_carteles/cartel4/CARTEL%204_4-4.pdf).
- [16] F. Yúbal, «Xataka Basics,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>.
- [17] *Robótica, Automatización, control industrial, microcontroladores, electrónica digital*, Argentina: WordPress, 2019.
- [18] J. Pujol, «El microcontrolador Arduino,» de *Tecnología, programación y robótica*, IES, 2009, p. 13.
- [19] J. Prado, «DOCPLAYER,» 2016. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/8731352-El-microcontrolador-arduino.html>.
- [20] B. ALLEN, *Programable Logic Controller User's*, Alemania , 1974.
- [21] M. CASTRO, *Controladores Lógicos Programables Parte I*, México: Mc Graw Hill, 2008.
- [22] OLLERO, *Manipuladores y Robots móviles.*, Barcelona: Alfaomega-Marcombo, 2008.
- [23] SIEMENS, *Manual de usuario SIMATIC S7 1200*, 2009.
- [24] G. Fernando, *CONTROLADORES PID*, Madrid: Dpto. de Informática y Automática ETSI de Informática, UNED, 2007.
- [25] K. Astrom y T. & Hagglund, *Control PID avanzado*, España: Pearson Educación S.A, 2009.
- [26] A. R. Victor M, «METODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES,» *INGENIERIA, Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 12, nº 1 y 2, 2002.

- [27] H. Rosero y M. Giovanny, SISTEMA DE CONTROL DE CASCADA DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL APRENDIZAJE DE CONTROL DE PROCESOS, Latacunga, 2018.
- [28] «DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS,» de *Análisis en el dominio del tiempo de sistemas de primer y segundo orden*, Madrid, 2014, p. 30.
- [29] J. Novoa y W. Martinez, «SINTONIZACIÓN PARA SISTEMAS INTEGRANTES,» de *Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.*, Barranquilla, CUC, 2019, p. 89.
- [30] D. García, «OpenWebinars,» 10 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://openwebinars.net/blog/que-es-unity/#:~:text=Unity%20es%20una%20herramienta%20que,o%20soporte%20de%20Realidad%20Virtual..>
- [31] U. Technologies, «Unity,» Unity Reflect, 30 05 2005. [En línea]. Available: <https://unity.com/es/products/unity-reflect>.
- [32] O. Álvarez y D. Zapata, LA ENSEÑANZA VIRTUAL EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR, Bogotá: ICFES, 2002.
- [33] V. G. KG, Measurement technology for level, Alemania, 1950.
- [34] W. v. Siemens, Level measurement guide: for complete level solutions, Alemania: Marcombo, 1847.
- [35] B. Diego, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE LOQUIDOS, Quito: UNTI, 1994.
- [36] J. Torres y J. Martinez, Diseño e implementacion de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID, Guayaquil: INSTRU, 2015.
- [37] «NORMA INTERNACIONAL,» *ISO 9001*, p. 45, 2015.
- [38] C. Antonio, Instrumentación Industrial, Octava ed., vol. 8, Barcelona : Alfaomega, 2010, pp. 195-226.
- [39] R. Marcelo, CONTROL DEL VARIADOR DE FRECUENCIA SINAMICS G110 A TRAVÉS DEL PUERTO SERIAL RS-485., Loja, 2013.
- [40] H. Alvarado, «UNEFA,» 16 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/khenryhgaj/clase7-sistemas-de-segundo-orden-1>.

- [41] W. Grega, Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education, Polonia, 2003.
- [42] W. Grega, Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education, Polonia: ResearchGate, 2003.
- [43] «MANUAL BÁSICO DE LABVIEW DE MASTERHACKS,» de *MANUAL BÁSICO DE PROGRAMACIÓN EN LABVIEW*, Masterhacks, 2013, p. 84.
- [44] C. Trueba, «Change Country,» Eicos Sensores SL, [En línea]. Available: <http://www.eicos.com/datos-tecnicos/que-es-un-sensor-de-nivel/>.
- [45] L. Restrepo y J. d. J. Cardona, «DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL PARA LA PREPARACIÓN DE LÍQUIDOS DIALIZANTES BASADO EN SEÑALES ULTRASÓNICAS,» Pereira, 2015.
- [46] «CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE BOMBAS,» *FNMT*, p. 14.

## 10. ANEXOS

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>	
<b>ANEXOS</b>	<b>TABLAS Y DIAGRAMAS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN</b>	<b>0</b>
<p><b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b></p> <p><b>FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS</b></p> <p><b>CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA</b></p> <p><b>PROPUESTA TECNOLÓGICA</b></p> <p><b>TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.</b></p> <p><b>Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electromecánica</b></p> <p><b>Autores:</b></p> <p><b>Caillagua Cuyo Erick Javier</b></p> <p><b>Herrera Bravo Cristian Daniel</b></p>		

Datos obtenidos del comportamiento de la planta real para la adquisición del modelo matemático.

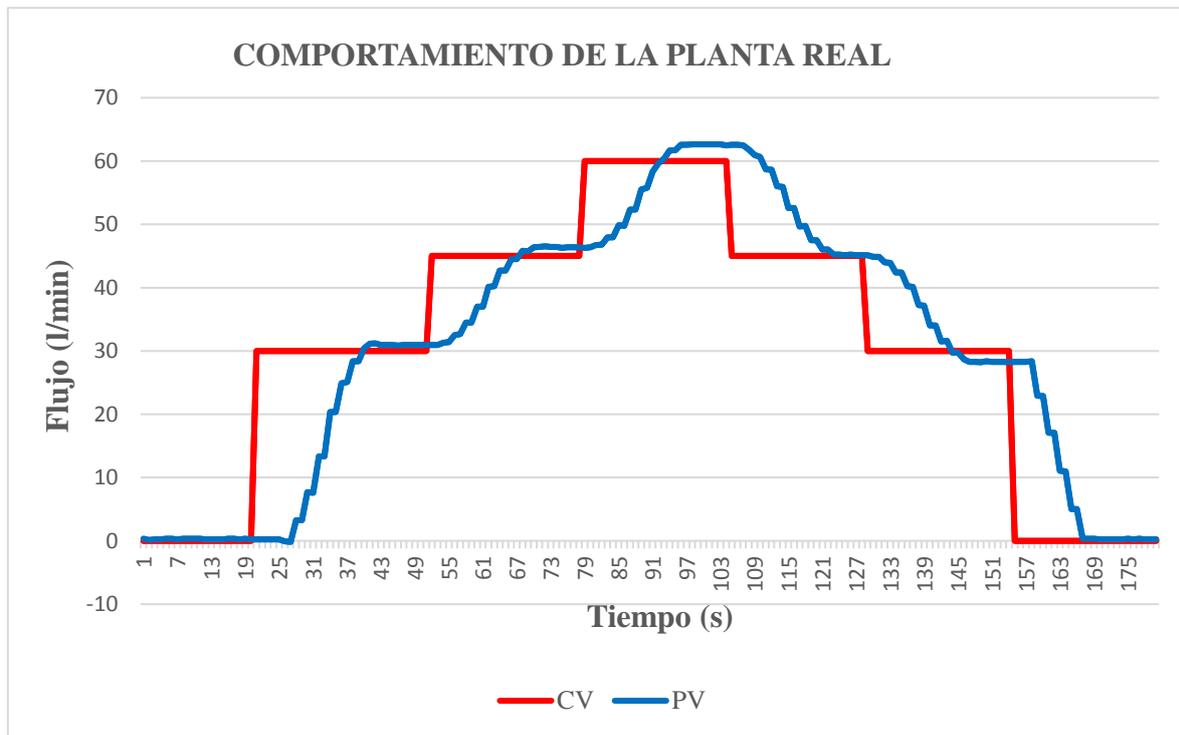
**VARIABLES DE LA PLANTA REAL**

Fecha-Hora	CV	PV
26/02/21-11:42:00	0	0,33
26/02/21-11:42:02	0	0,14
26/02/21-11:42:03	0	0,24
26/02/21-11:42:04	0	0,24
26/02/21-11:42:05	0	0,33
26/02/21-11:42:06	0	0,33
26/02/21-11:42:07	0	0,24
26/02/21-11:42:08	0	0,33
26/02/21-11:42:09	0	0,33
26/02/21-11:42:10	0	0,33
26/02/21-11:42:11	0	0,33
26/02/21-11:42:12	0	0,24
26/02/21-11:42:13	0	0,24
26/02/21-11:42:14	0	0,24
26/02/21-11:42:15	0	0,24
26/02/21-11:42:16	0	0,33
26/02/21-11:42:17	0	0,33
26/02/21-11:42:18	0	0,24
26/02/21-11:42:19	0	0,33
26/02/21-11:42:21	0	0,24
26/02/21-11:42:22	30	0,24
26/02/21-11:42:23	30	0,24
26/02/21-11:42:24	30	0,24
26/02/21-11:42:25	30	0,24
26/02/21-11:42:26	30	0,24
26/02/21-11:42:27	30	-0,06
26/02/21-11:42:28	30	-0,16
26/02/21-11:42:29	30	3,26
26/02/21-11:42:30	30	3,26
26/02/21-11:42:31	30	7,72
26/02/21-11:42:32	30	7,62
26/02/21-11:42:33	30	13,37
26/02/21-11:42:34	30	13,37
26/02/21-11:42:35	30	20,34
26/02/21-11:42:37	30	20,34
26/02/21-11:42:38	30	24,9

26/02/21-11:42:39	30	25,08
26/02/21-11:42:40	30	28,39
26/02/21-11:42:41	30	28,39
26/02/21-11:42:42	30	30,4
26/02/21-11:42:43	30	31,13
26/02/21-11:42:44	30	31,22
26/02/21-11:42:45	30	30,95
26/02/21-11:42:46	30	30,95
26/02/21-11:42:47	30	30,95
26/02/21-11:42:48	30	30,86
26/02/21-11:42:49	30	30,95
26/02/21-11:42:50	30	30,95
26/02/21-11:42:51	30	30,95
26/02/21-11:42:52	30	30,95
26/02/21-11:42:54	30	30,95
26/02/21-11:42:55	45	30,95
26/02/21-11:42:56	45	30,95
26/02/21-11:42:57	45	31,31
26/02/21-11:42:58	45	31,4
26/02/21-11:42:59	45	32,49
26/02/21-11:43:00	45	32,67
26/02/21-11:43:01	45	34,48
26/02/21-11:43:02	45	34,48
26/02/21-11:43:03	45	37
26/02/21-11:43:04	45	37
26/02/21-11:43:05	45	40,12
26/02/21-11:43:06	45	40,21
26/02/21-11:43:07	45	42,68
26/02/21-11:43:08	45	42,68
26/02/21-11:43:09	45	44,53
26/02/21-11:43:10	45	44,53
26/02/21-11:43:11	45	45,84
26/02/21-11:43:12	45	45,75
26/02/21-11:43:13	45	46,37
26/02/21-11:43:15	45	46,45
26/02/21-11:43:16	45	46,54
26/02/21-11:43:17	45	46,45
26/02/21-11:43:18	45	46,45
26/02/21-11:43:19	45	46,28
26/02/21-11:43:20	45	46,37
26/02/21-11:43:21	45	46,37
26/02/21-11:43:22	45	46,37
26/02/21-11:43:23	60	46,28

26/02/21-11:43:24	60	46,37
26/02/21-11:43:25	60	46,71
26/02/21-11:43:26	60	46,8
26/02/21-11:43:27	60	47,93
26/02/21-11:43:28	60	47,93
26/02/21-11:43:29	60	49,84
26/02/21-11:43:31	60	49,75
26/02/21-11:43:32	60	52,33
26/02/21-11:43:33	60	52,33
26/02/21-11:43:34	60	55,49
26/02/21-11:43:35	60	55,75
26/02/21-11:43:36	60	58,28
26/02/21-11:43:37	60	59,63
26/02/21-11:43:38	60	60,3
26/02/21-11:43:39	60	61,64
26/02/21-11:43:40	60	61,72
26/02/21-11:43:41	60	62,55
26/02/21-11:43:42	60	62,55
26/02/21-11:43:43	60	62,64
26/02/21-11:43:44	60	62,64
26/02/21-11:43:45	60	62,64
26/02/21-11:43:46	60	62,64
26/02/21-11:43:47	60	62,64
26/02/21-11:43:48	60	62,64
26/02/21-11:43:49	60	62,47
26/02/21-11:43:50	45	62,55
26/02/21-11:43:52	45	62,55
26/02/21-11:43:53	45	62,47
26/02/21-11:43:54	45	61,8
26/02/21-11:43:55	45	60,97
26/02/21-11:43:56	45	60,64
26/02/21-11:43:57	45	58,71
26/02/21-11:43:58	45	58,62
26/02/21-11:43:59	45	56
26/02/21-11:44:00	45	55,92
26/02/21-11:44:01	45	52,59
26/02/21-11:44:02	45	52,59
26/02/21-11:44:03	45	49,67
26/02/21-11:44:04	45	49,75
26/02/21-11:44:05	45	47,5
26/02/21-11:44:06	45	47,5
26/02/21-11:44:07	45	46,02
26/02/21-11:44:08	45	46,02
26/02/21-11:44:09	45	45,23
26/02/21-11:44:11	45	45,23
26/02/21-11:44:12	45	45,14
26/02/21-11:44:13	45	45,23
26/02/21-11:44:14	45	45,14
26/02/21-11:44:15	45	45,14

26/02/21-11:44:16	30	45,14
26/02/21-11:44:17	30	44,88
26/02/21-11:44:18	30	44,88
26/02/21-11:44:19	30	44
26/02/21-11:44:20	30	43,91
26/02/21-11:44:21	30	42,42
26/02/21-11:44:22	30	42,42
26/02/21-11:44:23	30	40,21
26/02/21-11:44:24	30	40,12
26/02/21-11:44:25	30	37,26
26/02/21-11:44:26	30	37,17
26/02/21-11:44:27	30	34,03
26/02/21-11:44:28	30	34,03
26/02/21-11:44:29	30	31,49
26/02/21-11:44:31	30	31,58
26/02/21-11:44:32	30	29,76
26/02/21-11:44:33	30	29,76
26/02/21-11:44:34	30	28,67
26/02/21-11:44:35	30	28,3
26/02/21-11:44:36	30	28,3
26/02/21-11:44:37	30	28,21
26/02/21-11:44:38	30	28,39
26/02/21-11:44:39	30	28,3
26/02/21-11:44:40	30	28,3
26/02/21-11:44:41	30	28,3
26/02/21-11:44:42	30	28,21
26/02/21-11:44:43	0	28,3
26/02/21-11:44:44	0	28,3
26/02/21-11:44:45	0	28,3
26/02/21-11:44:46	0	28,39
26/02/21-11:44:47	0	22,95
26/02/21-11:44:48	0	22,86
26/02/21-11:44:49	0	17,06
26/02/21-11:44:50	0	17,06
26/02/21-11:44:51	0	11,08
26/02/21-11:44:52	0	10,98
26/02/21-11:44:53	0	5,01
26/02/21-11:44:55	0	5,01
26/02/21-11:44:56	0	0,33
26/02/21-11:44:57	0	0,33
26/02/21-11:44:58	0	0,33
26/02/21-11:44:59	0	0,24
26/02/21-11:45:00	0	0,24
26/02/21-11:45:01	0	0,24
26/02/21-11:45:02	0	0,24
26/02/21-11:45:03	0	0,24
26/02/21-11:45:04	0	0,33
26/02/21-11:45:05	0	0,24
26/02/21-11:45:06	0	0,33



**Figura1.** Dinámica del comportamiento de la planta real.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>	
<b>ANEXOS</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>2</b>

Datos obtenidos del comportamiento de la planta virtual donde se puede observar una dinámica similar a la de la planta real.

**VARIABLES DE LA PLANTA VIRTUAL**

Fecha-Hora	PV	CV
27/2/2017 14:14:09,687	0	0
27/2/2017 14:14:10,698	0	0
27/2/2017 14:14:11,716	0	0
27/2/2017 14:14:12,729	0	0
27/2/2017 14:14:13,763	0	0
27/2/2017 14:14:14,793	0	0
27/2/2017 14:14:15,808	0	0
27/2/2017 14:14:16,824	0	0
27/2/2017 14:14:17,846	0	0
27/2/2017 14:14:18,872	0	0
27/2/2017 14:14:19,895	0	0
27/2/2017 14:14:20,912	0	0

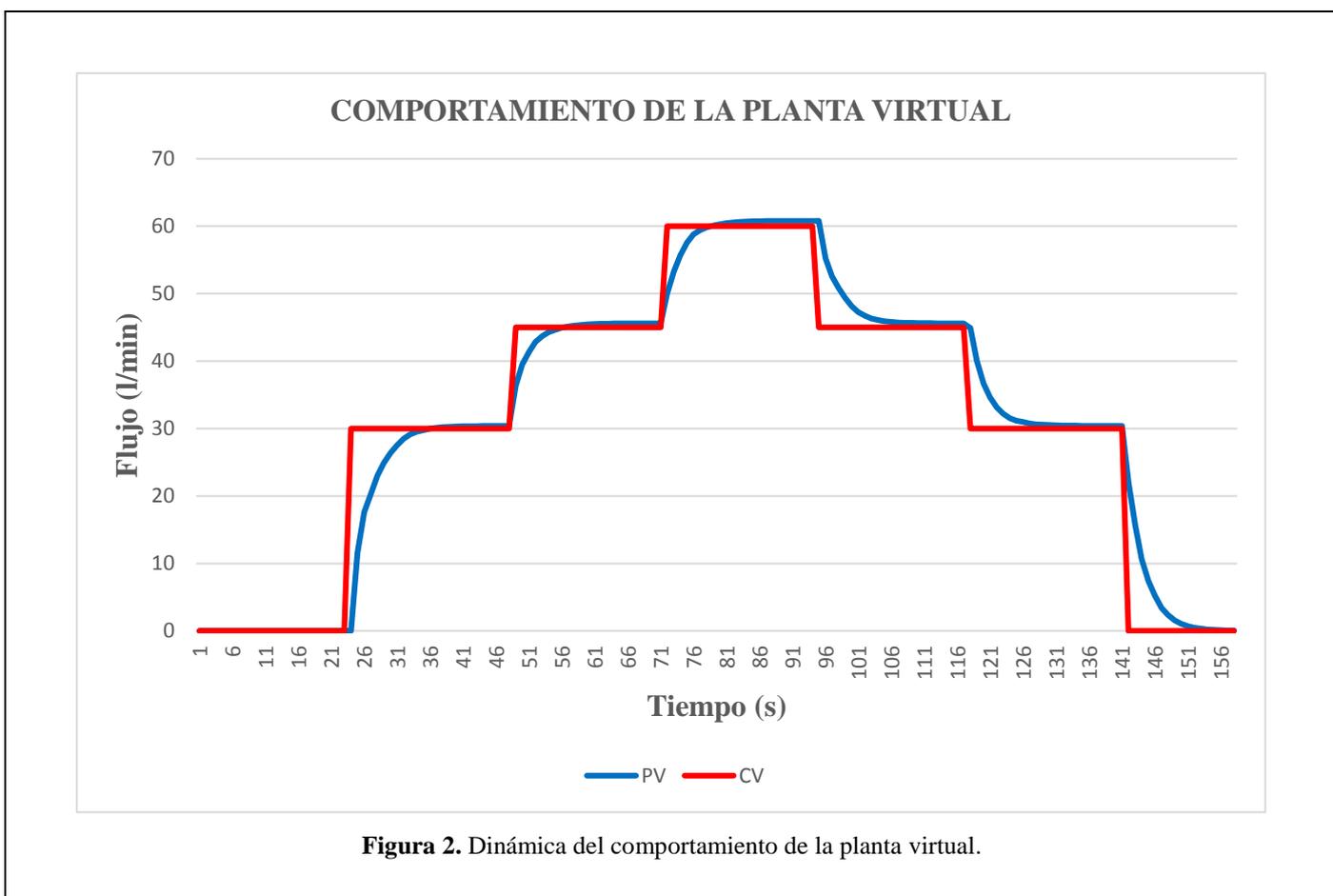
27/2/2017 14:14:21,923	0	0
27/2/2017 14:14:22,951	0	0
27/2/2017 14:14:23,957	0	0
27/2/2017 14:14:24,964	0	0
27/2/2017 14:14:25,987	0	0
27/2/2017 14:14:26,990	0	0
27/2/2017 14:14:28,006	0	0
27/2/2017 14:14:29,036	0	0
27/2/2017 14:14:30,046	0	0
27/2/2017 14:14:31,059	0	0
27/2/2017 14:14:32,094	0	0
27/2/2017 14:14:33,095	0	30
27/2/2017 14:14:34,119	11,566038	30
27/2/2017 14:14:35,140	17,617723	30
27/2/2017 14:14:36,161	20,223838	30
27/2/2017 14:14:37,175	23,004929	30
27/2/2017 14:14:38,201	24,90215	30
27/2/2017 14:14:39,232	26,404934	30
27/2/2017 14:14:40,248	27,497096	30

27/2/2017 14:14:41,272	28,51827	30
27/2/2017 14:14:42,289	29,152298	30
27/2/2017 14:14:43,300	29,553807	30
27/2/2017 14:14:44,328	29,785568	30
27/2/2017 14:14:45,359	29,983617	30
27/2/2017 14:14:46,394	30,136808	30
27/2/2017 14:14:47,411	30,21786	30
27/2/2017 14:14:48,424	30,277021	30
27/2/2017 14:14:49,438	30,320955	30
27/2/2017 14:14:50,453	30,344428	30
27/2/2017 14:14:51,486	30,362024	30
27/2/2017 14:14:52,510	30,377232	30
27/2/2017 14:14:53,540	30,38519	30
27/2/2017 14:14:54,547	30,390327	30
27/2/2017 14:14:55,554	30,394431	30
27/2/2017 14:14:56,572	30,396863	30
27/2/2017 14:14:57,595	30,398513	30
27/2/2017 14:14:58,626	36,39523	45
27/2/2017 14:14:59,636	39,494393	45
27/2/2017 14:15:00,645	41,361385	45
27/2/2017 14:15:01,669	42,852458	45
27/2/2017 14:15:02,674	43,693115	45
27/2/2017 14:15:03,675	44,276839	45
27/2/2017 14:15:04,681	44,660924	45
27/2/2017 14:15:05,698	44,963597	45
27/2/2017 14:15:06,709	45,15902	45
27/2/2017 14:15:07,735	45,294715	45
27/2/2017 14:15:08,739	45,388937	45
27/2/2017 14:15:09,745	45,467316	45
27/2/2017 14:15:10,754	45,510909	45
27/2/2017 14:15:11,789	45,540496	45
27/2/2017 14:15:12,819	45,560578	45
27/2/2017 14:15:13,848	45,575491	45
27/2/2017 14:15:14,883	45,58475	45
27/2/2017 14:15:15,887	45,590613	45
27/2/2017 14:15:16,889	45,594593	45
27/2/2017 14:15:17,896	45,597028	45
27/2/2017 14:15:18,931	45,598947	45
27/2/2017 14:15:19,943	45,600311	45
27/2/2017 14:15:20,975	45,601216	45
27/2/2017 14:15:21,987	50,004327	60
27/2/2017 14:15:23,019	53,305064	60
27/2/2017 14:15:24,030	55,714349	60
27/2/2017 14:15:25,045	57,577926	60
27/2/2017 14:15:26,072	58,805243	60
27/2/2017 14:15:27,080	59,416129	60
27/2/2017 14:15:28,102	59,840308	60
27/2/2017 14:15:29,110	60,103628	60
27/2/2017 14:15:30,120	60,306471	60

27/2/2017 14:15:31,146	60,466319	60
27/2/2017 14:15:32,178	60,57481	60
27/2/2017 14:15:33,198	60,644858	60
27/2/2017 14:15:34,226	60,693497	60
27/2/2017 14:15:35,257	60,729	60
27/2/2017 14:15:36,267	60,753096	60
27/2/2017 14:15:37,270	60,770229	60
27/2/2017 14:15:38,289	60,780551	60
27/2/2017 14:15:39,295	60,789137	60
27/2/2017 14:15:40,329	60,794139	60
27/2/2017 14:15:41,359	60,797307	60
27/2/2017 14:15:42,373	60,799353	60
27/2/2017 14:15:43,399	60,800773	60
27/2/2017 14:15:44,409	60,801859	60
27/2/2017 14:15:45,425	60,802479	45
27/2/2017 14:15:46,432	55,237186	45
27/2/2017 14:15:47,440	52,604732	45
27/2/2017 14:15:48,455	50,808909	45
27/2/2017 14:15:49,456	49,386441	45
27/2/2017 14:15:50,488	48,113006	45
27/2/2017 14:15:51,501	47,268185	45
27/2/2017 14:15:52,532	46,733188	45
27/2/2017 14:15:53,565	46,31937	45
27/2/2017 14:15:54,580	46,100423	45
27/2/2017 14:15:55,609	45,918292	45
27/2/2017 14:15:56,611	45,826976	45
27/2/2017 14:15:57,623	45,75159	45
27/2/2017 14:15:58,624	45,706176	45
27/2/2017 14:15:59,657	45,673027	45
27/2/2017 14:16:00,667	45,647387	45
27/2/2017 14:16:01,676	45,631135	45
27/2/2017 14:16:02,707	45,621665	45
27/2/2017 14:16:03,742	45,615668	45
27/2/2017 14:16:04,763	45,611215	45
27/2/2017 14:16:05,787	45,608704	45
27/2/2017 14:16:06,794	45,606961	45
27/2/2017 14:16:07,818	45,60524	45
27/2/2017 14:16:08,830	44,927075	30
27/2/2017 14:16:09,849	40,038206	30
27/2/2017 14:16:10,858	36,650749	30
27/2/2017 14:16:11,866	34,643129	30
27/2/2017 14:16:12,898	33,152227	30
27/2/2017 14:16:13,913	32,226552	30
27/2/2017 14:16:14,930	31,532425	30
27/2/2017 14:16:15,959	31,18693	30
27/2/2017 14:16:16,963	30,972455	30
27/2/2017 14:16:17,994	30,77192	30
27/2/2017 14:16:19,002	30,641881	30
27/2/2017 14:16:20,004	30,564811	30

27/2/2017 14:16:21,031	30,523053	30
27/2/2017 14:16:22,051	30,482309	30
27/2/2017 14:16:23,067	30,456507	30
27/2/2017 14:16:24,071	30,438161	30
27/2/2017 14:16:25,090	30,426543	30
27/2/2017 14:16:26,112	30,419042	30
27/2/2017 14:16:27,133	30,413833	30
27/2/2017 14:16:28,165	30,409331	30
27/2/2017 14:16:29,170	30,407208	30
27/2/2017 14:16:30,171	30,405616	30
27/2/2017 14:16:31,204	30,404454	30
27/2/2017 14:16:32,220	30,403592	30
27/2/2017 14:16:33,236	22,096033	0
27/2/2017 14:16:34,237	15,696544	0
27/2/2017 14:16:35,240	10,653503	0

27/2/2017 14:16:36,247	7,397441	0
27/2/2017 14:16:37,254	5,254982	0
27/2/2017 14:16:38,278	3,407676	0
27/2/2017 14:16:39,285	2,366177	0
27/2/2017 14:16:40,305	1,569766	0
27/2/2017 14:16:41,335	1,041412	0
27/2/2017 14:16:42,349	0,690892	0
27/2/2017 14:16:43,368	0,46892	0
27/2/2017 14:16:44,400	0,31109	0
27/2/2017 14:16:45,404	0,211142	0
27/2/2017 14:16:46,432	0,14661	0
27/2/2017 14:16:47,451	0,101801	0
27/2/2017 14:16:48,457	0,073985	0
27/2/2017 14:16:49,459	0,049083	0



### Pruebas para la obtención del modelo matemático

En el primer proceso experimental para la estabilidad de la planta se asignado un valor de 2 polos y 0 zero más tiempo muerto el cual nos da un resultado del 40.85% de similitud al proceso real de la planta física como se puede observar en la (figura 3.1).

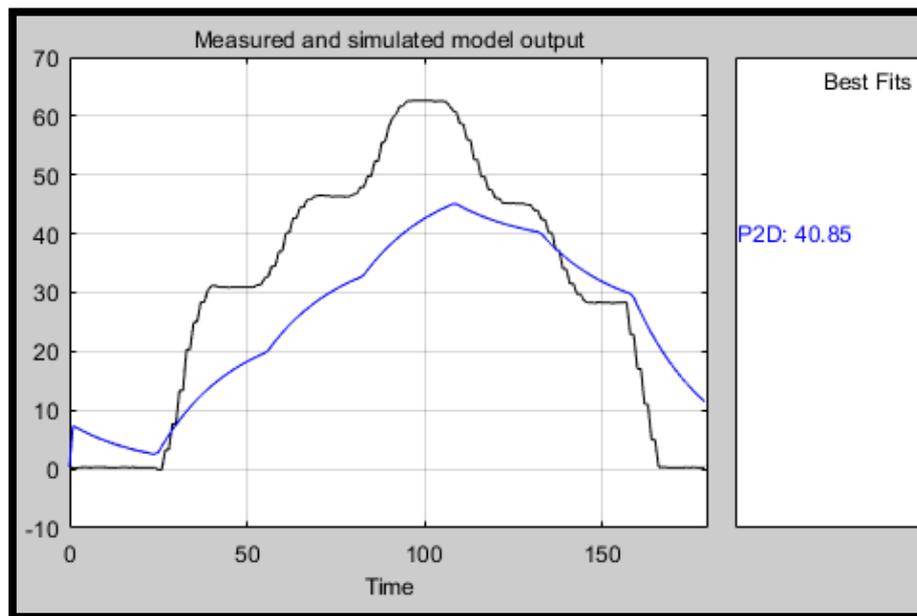


Figura 3.1: Respuesta de la dinámica del primer proceso experimental del sistema.

En el segundo proceso experimental para la estabilidad de la planta se asignado un valor de 1 polo y 1 zero más tiempo muerto el cual nos da un resultado del 69.67% de similitud al proceso real de la planta física como se puede observar en la (figura 3.2).

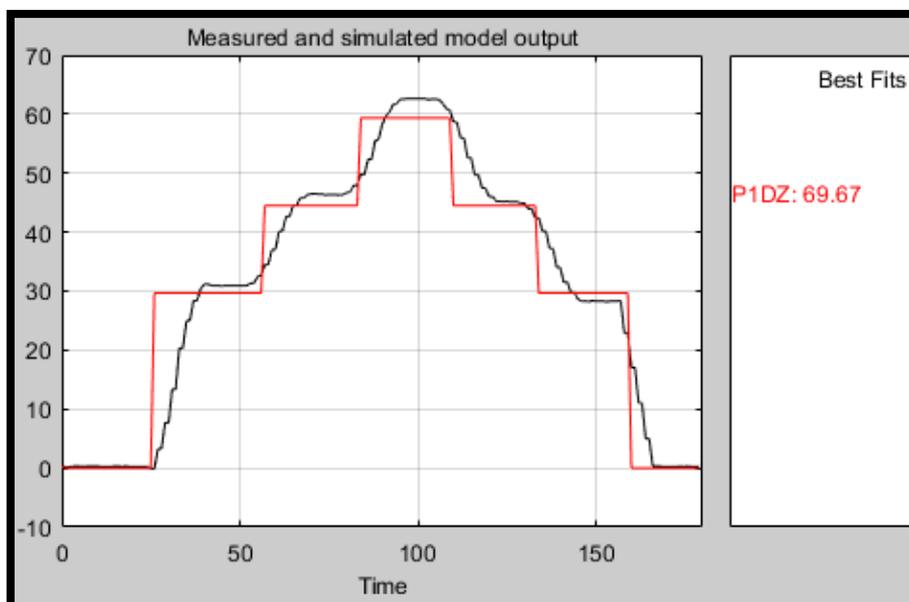
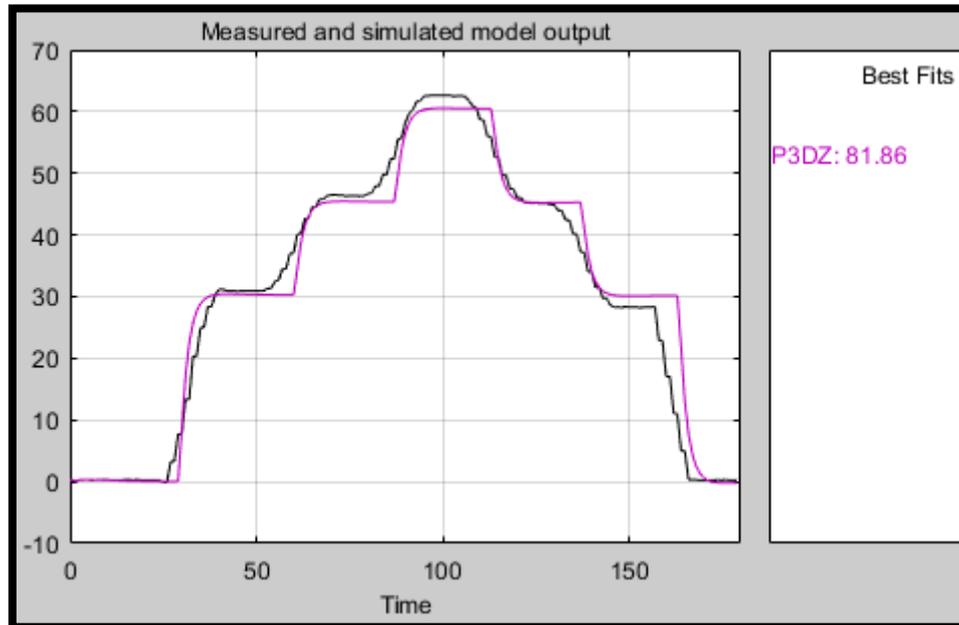


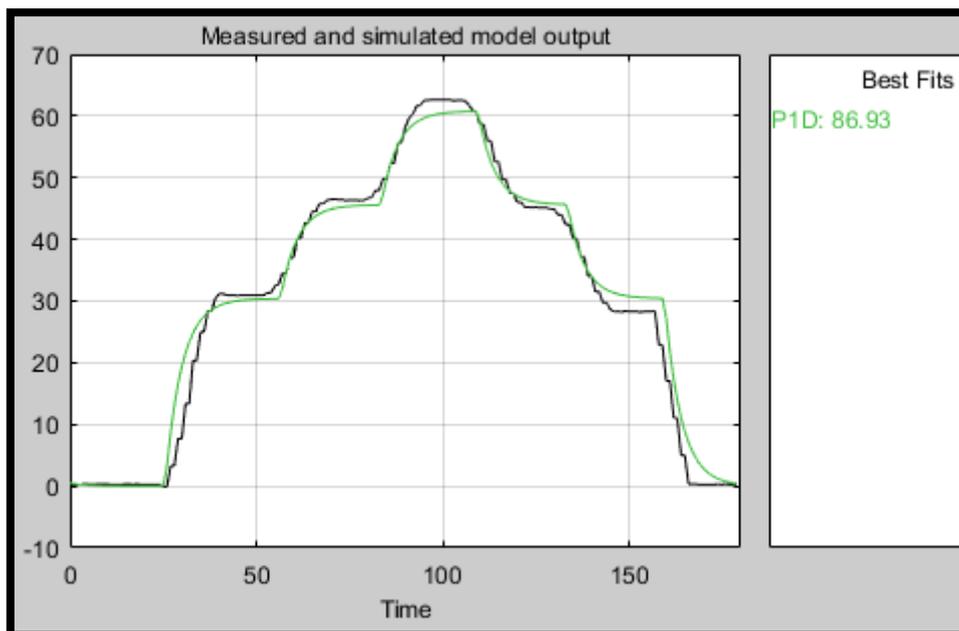
Figura 3.2: Respuesta de la dinámica del segundo proceso experimental del sistema.

En el tercer proceso experimental para la estabilidad de la planta se asignado un valor de 3 polos y 1 zero más tiempo muerto el cual nos da un resultado del 81.86% de similitud al proceso real de la planta física como se puede observar en la (figura 3.3).



**Figura 3.3:** Respuesta de la dinámica del tercer proceso experimental del sistema.

En el cuarto proceso experimental para la estabilidad de la planta se asignado un valor de 1 polo y 0 zeros el cual nos da un resultado del 86.93% de similitud al proceso real de la planta física como se puede observar en la (figura 3.4). En conclusión es el que más se asimila al comportamiento de la planta real y sobre pasa el 80% de similitud por lo que es apto para utilizarlo en el sistema virtual de flujo.



**Figura 3.4:** Respuesta de la dinámica del cuarto proceso experimental del sistema.

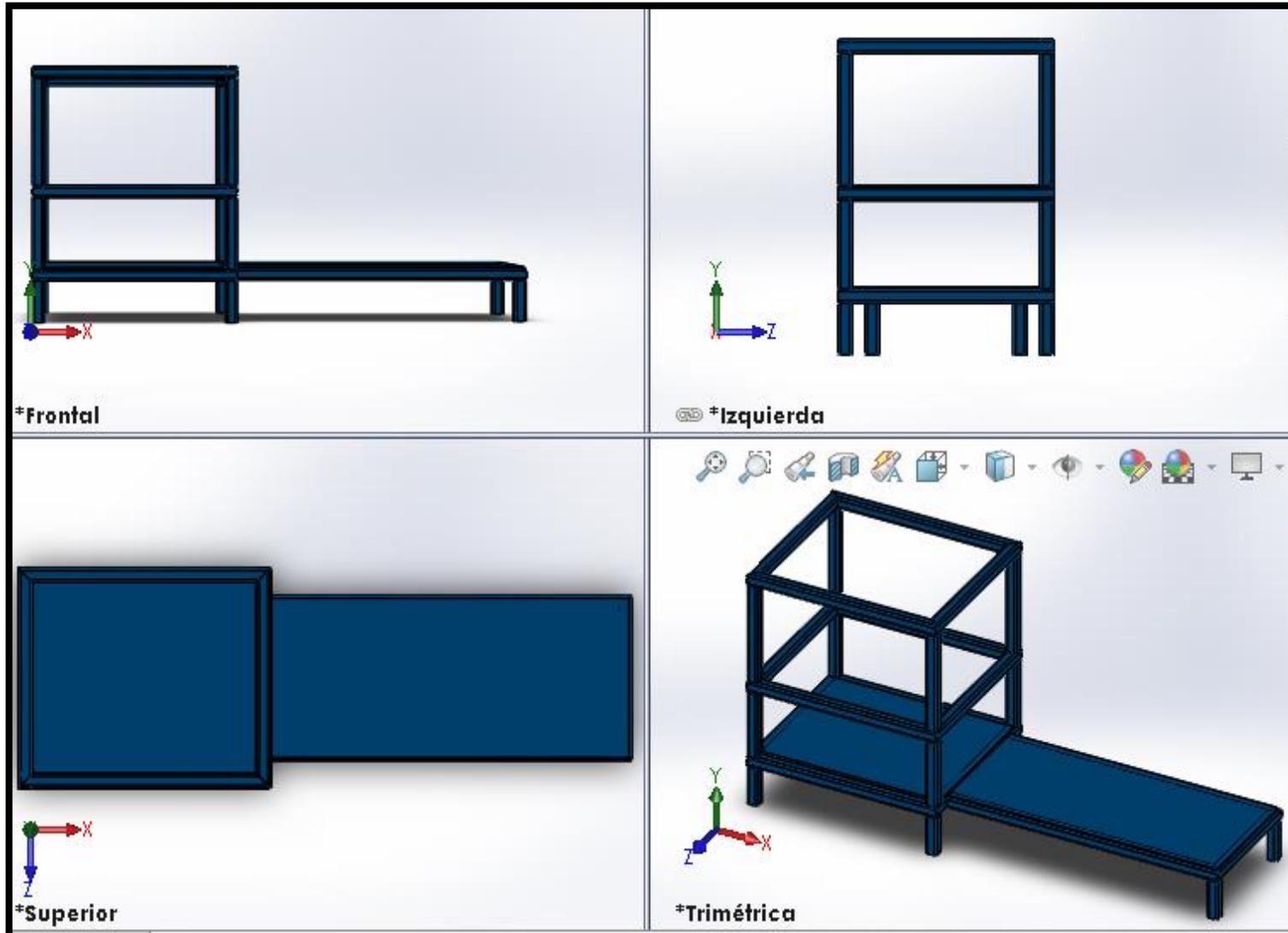
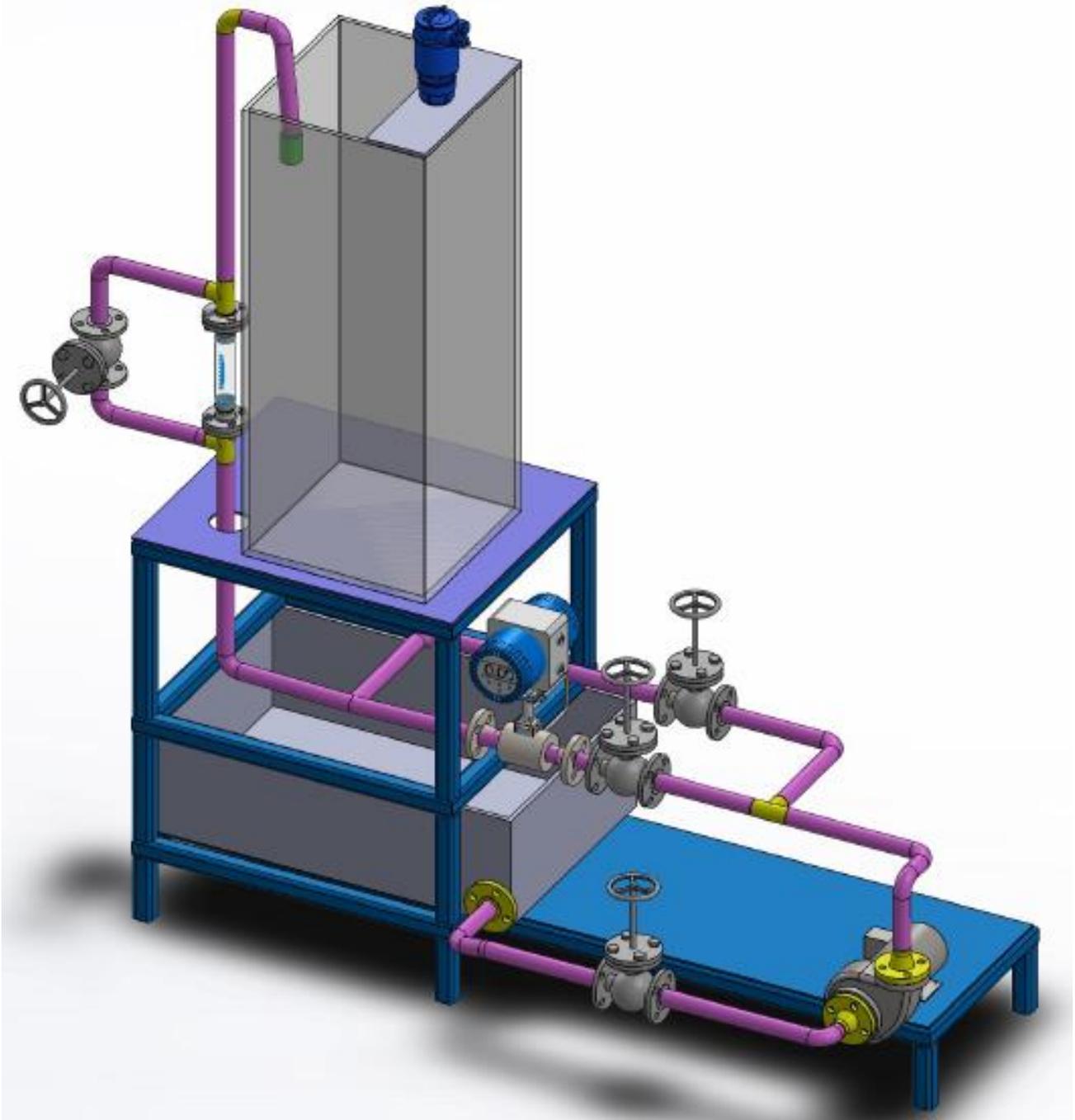
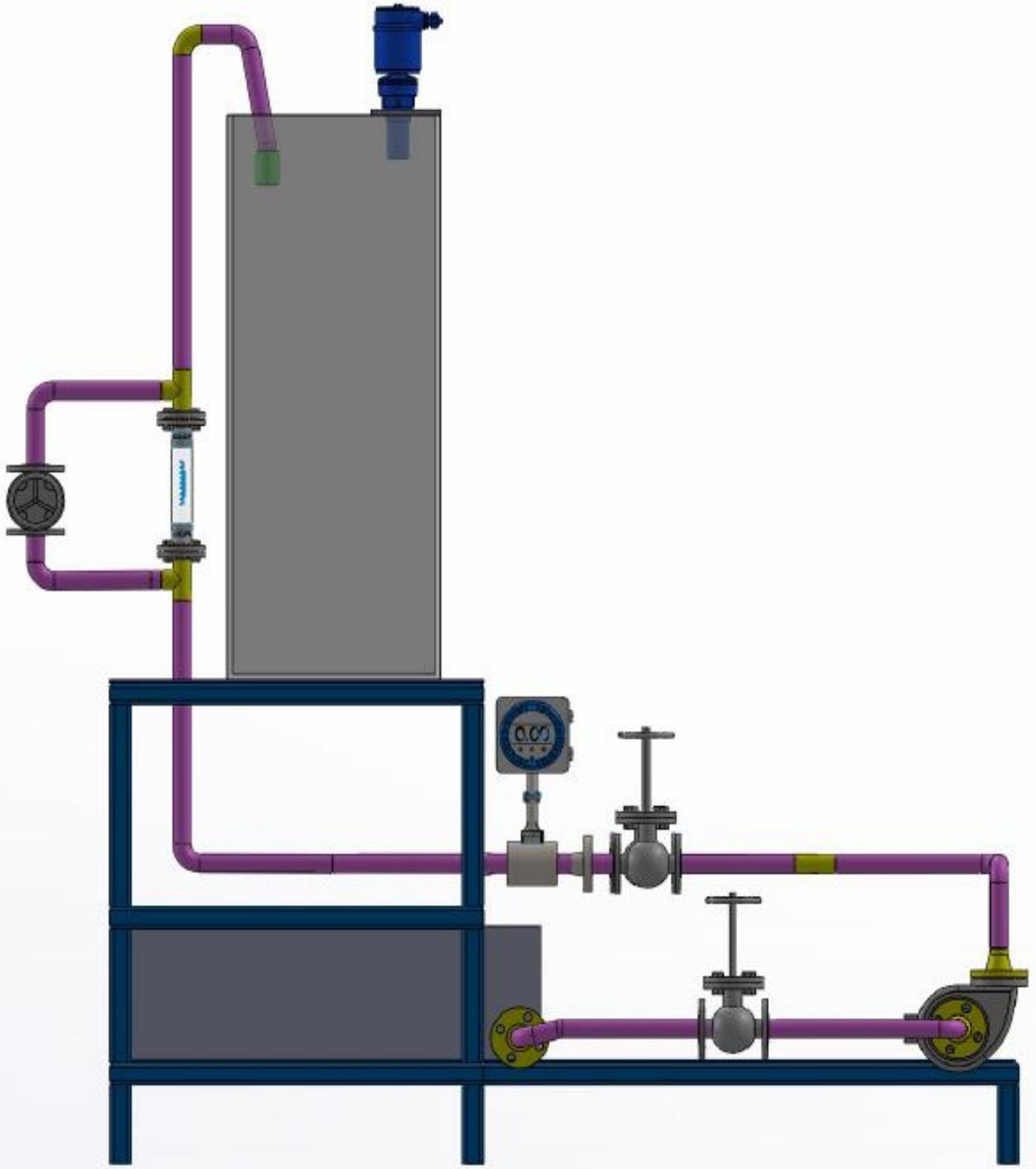


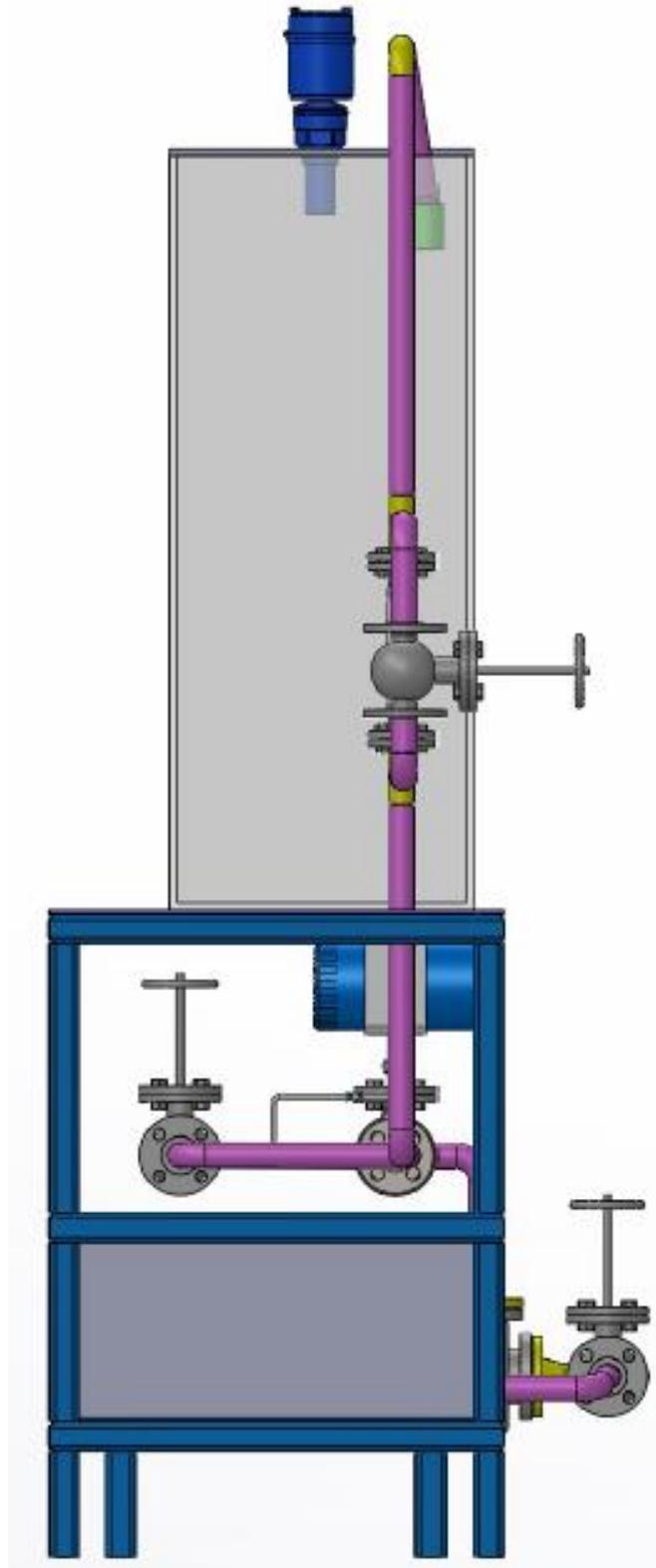
Figura 4.1: Estructura y vistas.



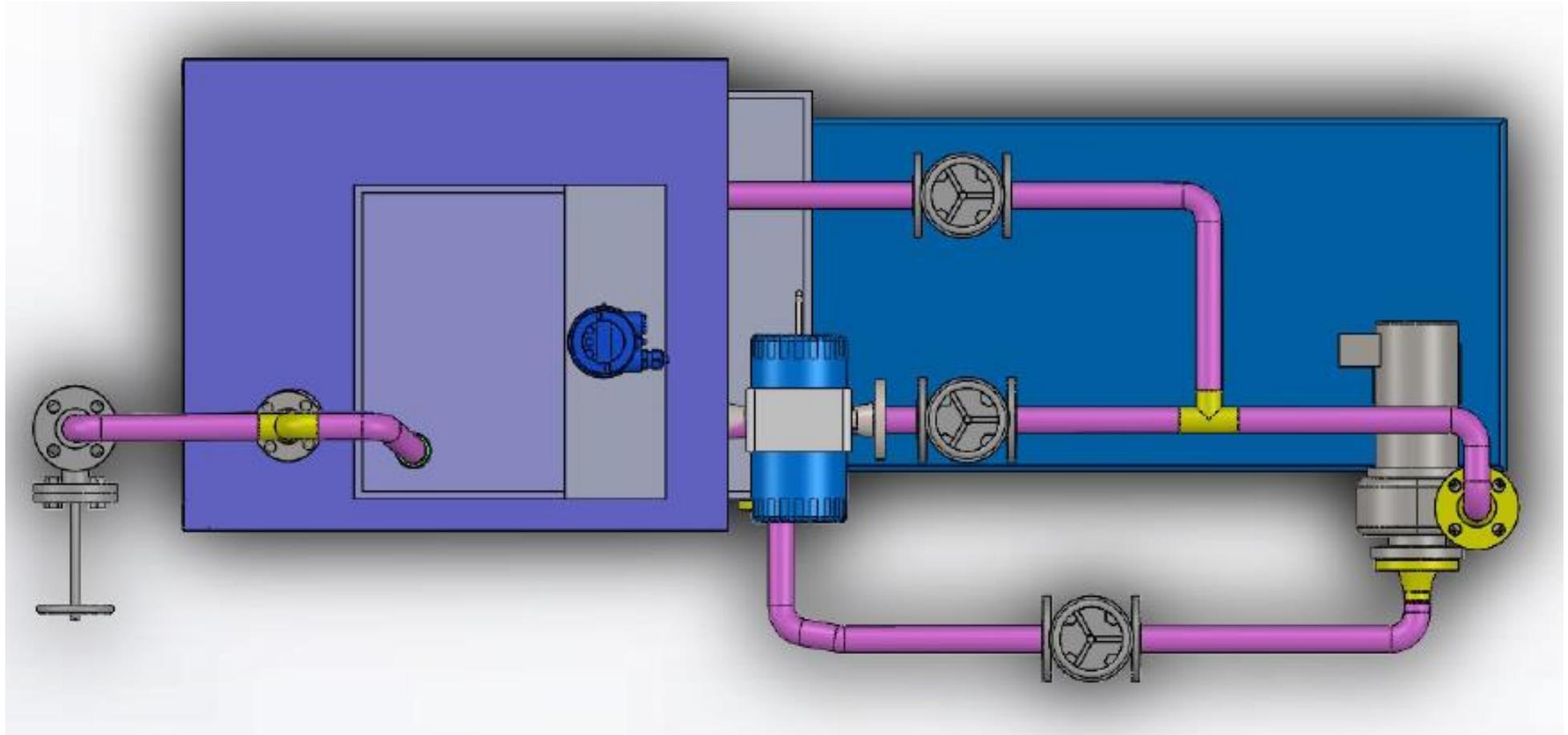
**Figura 5:** Diseño en 3D de la planta en SolidWork.



**Figura 5. 1:** vista Frontal de la planta.



**Figura 5.2:** Vista lateral de la planta.



**Figura 5.3:** Vista superior de la planta.

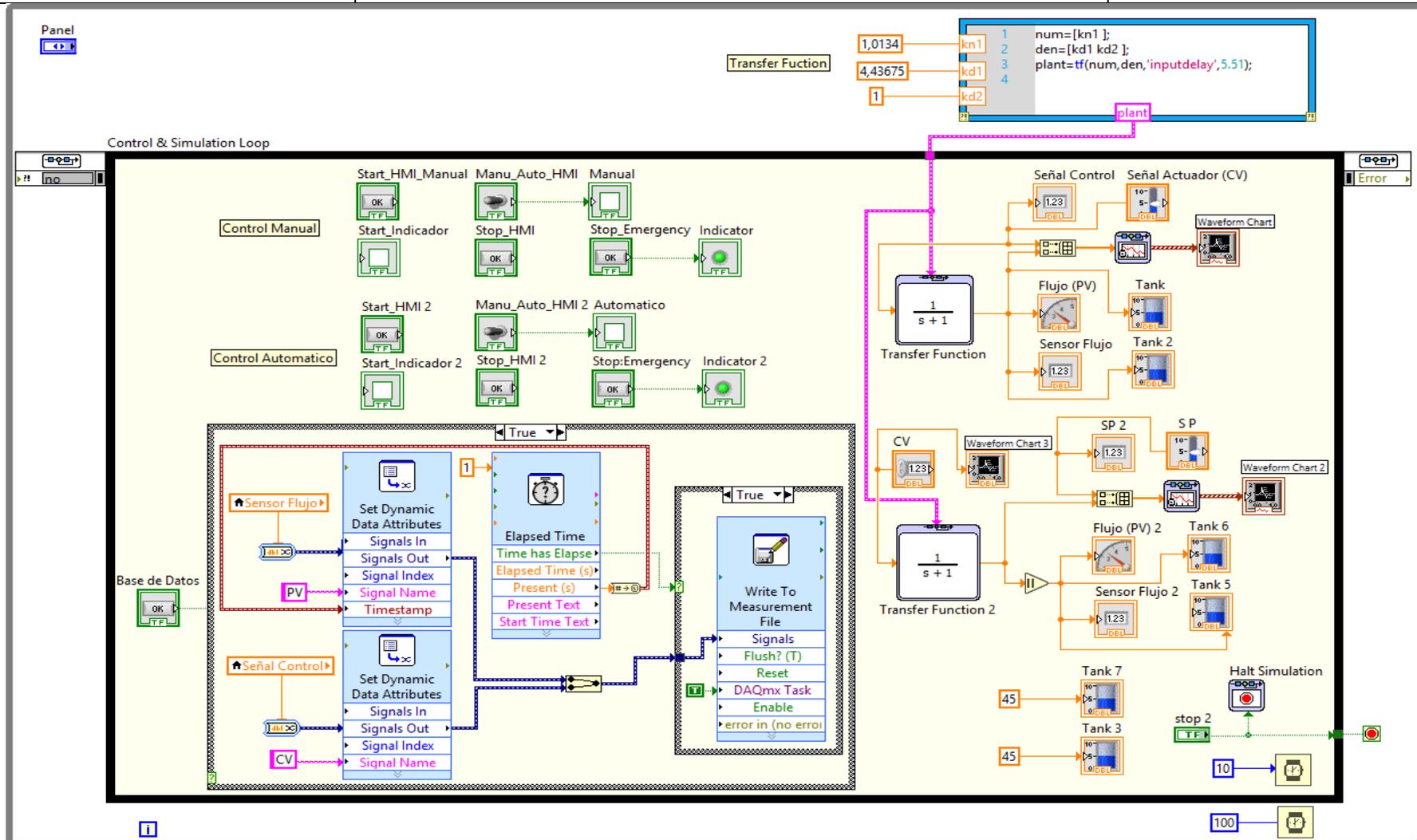


Figura 1: Diagrama de bloques.

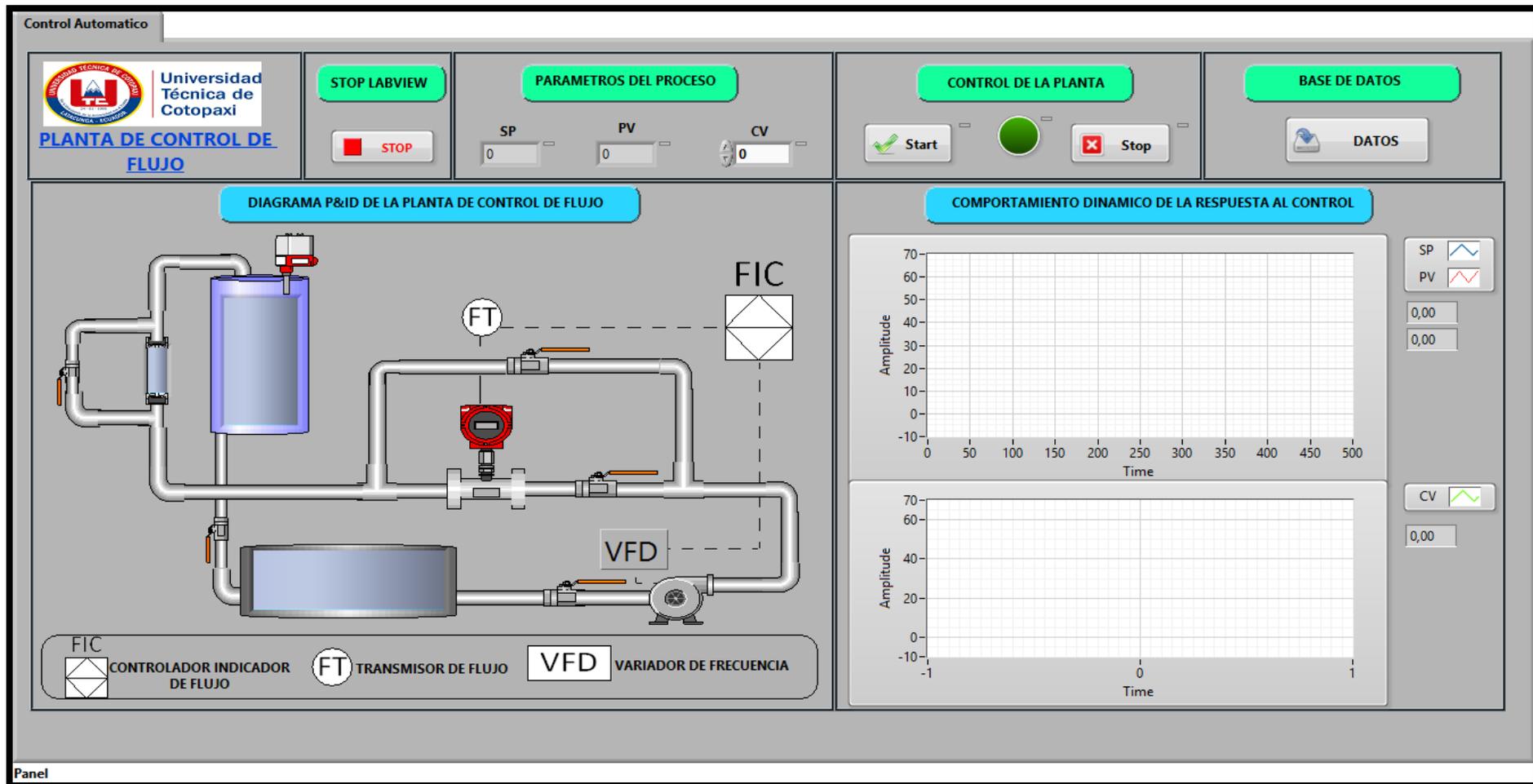
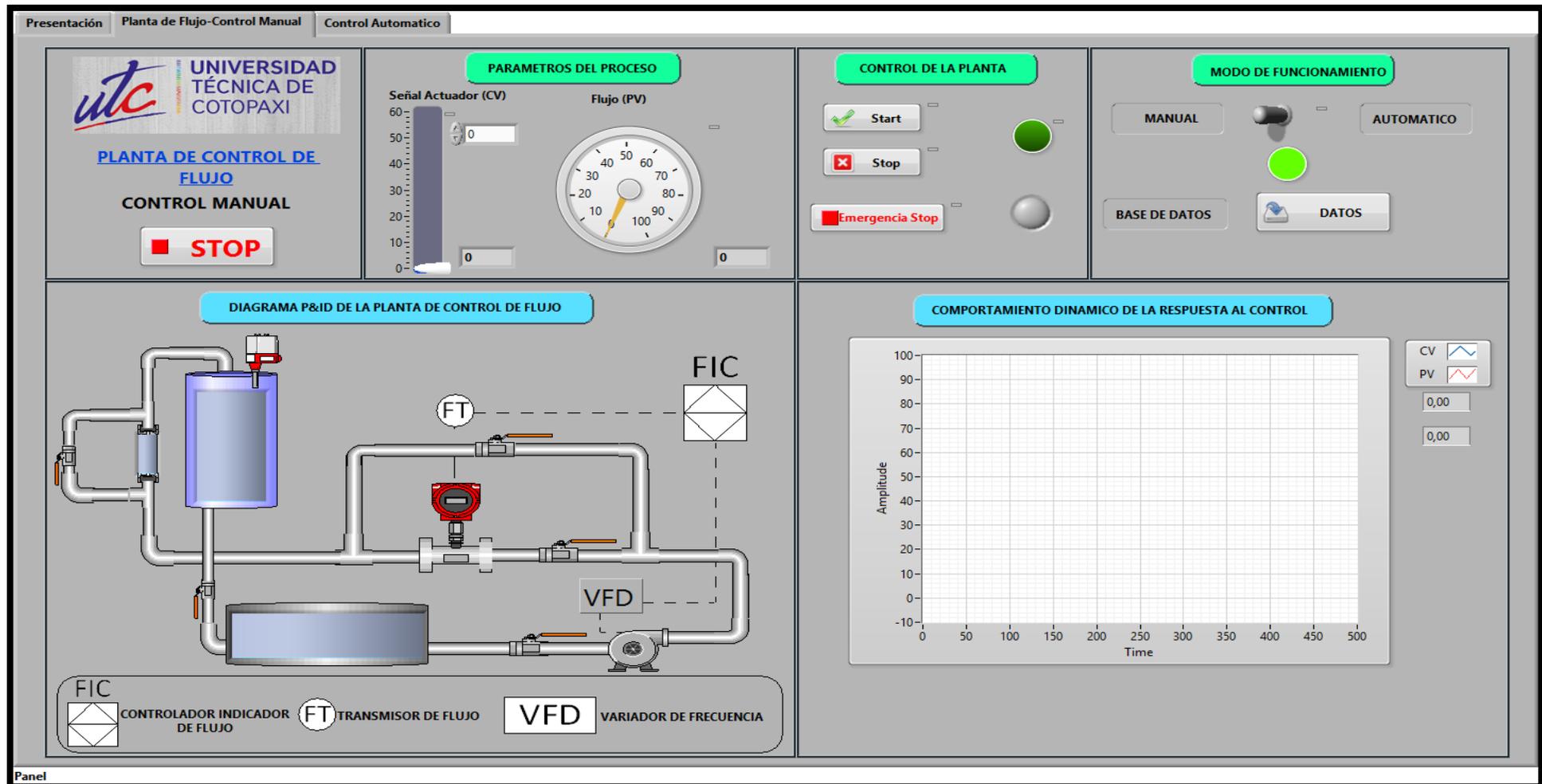


Figura 2: HMI para el monitoreo en control automático.



**Figura 3:** HMI para el monitoreo en control manual.



Figura 4: Entorno virtual en Unity3D.

### Programación en Arduino

```
#include <Wire.h>

#define Setpoint 0x60          //
Codigo del bus i2c. Ver video como
configurar.

unsigned int valor;

byte buffer[3];

const uint8_t inputPin1 = A0;

const uint8_t inputPin2 = A1;

int sp;

int aux;

int aux2;

unsigned long last_time = 0;

void setup() {

  Wire.begin();              //
  Activamos comunicacion i2c.

  Serial.begin(115200);

  Serial.setTimeout(100);

}

void loop() {

  if (Serial.available())

  {

    // incomingByte =
```

```
Serial.readString().toInt();

    aux = Serial.readStringUntil(';').toInt();

    aux2 = Serial.readStringUntil('\n').toInt();

    sp=map(aux,0,60,0,4095);      //
Leemos potenciómetro.

    //enviaI2C (intensidad,valor);

    enviaI2C (Setpoint,sp);

  }

  //Lectura de CV y PV

  short valor1 = analogRead(inputPin1);

  //delay(250);

  short valor2 = analogRead(inputPin2);

  String dataString = String(valor1);

  dataString += ",";

  dataString += String(valor2);

  //Envio de datos ppor puerto Serial

  Serial.flush();

  Serial.println(dataString);

  delay(100);

}

//Instruccion para enviar valor analogico por
I2C

void enviaI2C(int direccionBus, unsigned int
valorMCP4725){
```

```

buffer[0]= 0b01000000;           //
Byte de control.

buffer[1] = valorMCP4725 >> 4;   //
MSB 11-4 Shift right 4 places.

buffer[2] = valorMCP4725 << 4;   //
LSB 3-0 shift left 4 places.

Wire.beginTransmission (direccionBus);
// Direccion del dispositivo

Wire.write (buffer[0]);           //

```

```

Posicion 0 del array.

Wire.write (buffer[1]);           //
Posicion 1 (8 MSB).

Wire.write (buffer[2]);           //
Posicion 2 (4 LSB).

Wire.endTransmission();           // Fin
comunicacion.

}

```

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>	
<b>ANEXOS</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>11</b>
<p><b>Programación en Unity3D</b></p> <p><b>TEXT LEVEL</b></p> <pre> using System.Collections; using System.Collections.Generic; using UnityEngine; using TMPro;  public class text_Level : MonoBehaviour {     // Start is called before the first frame update     TextMeshPro mText;     public float valorC;     public float valorX;     //public NewBehaviourScript valor;     void Start()     {         mText = GetComponent&lt;TextMeshPro&gt;();         //myText.text = "wmmm";         //valor = FindObjectOfType&lt;NewBehaviourScript&gt;();         //Debug.Log(valor.valor3);     }      // Update is called once per frame     public void Update()     {         //print(valor);         //myText.text = valor.ToString();         NewBehaviourScript variable1 = GetComponent&lt;NewBehaviourScript&gt;();         valorC = variable1.valor4;         mText = (TextMeshPro)GameObject.Find("niveltmp").GetComponent&lt;TextMeshPro&gt;();         mText.text = "" +Mathf.Round( valorC * 0.0640f);         valorX = valorC;     }      public void Mostrardato() </pre>		

```

    {
        print(valorX);
    }
}

```

### TEXT CHARGER

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using TMPro;

public class text_Charger : MonoBehaviour
{
    // Start is called before the first frame update
    TextMeshPro myText;
    public float valorB;
    public float valorY;
    //public NewBehaviourScript valor;
    void Start()
    {
        myText = GetComponent<TextMeshPro>();
        //myText.text = "wmmm";
        //valor = FindObjectOfType<NewBehaviourScript>();
        //Debug.Log(valor.valor3);

    }

    // Update is called once per frame
    public void Update()
    {
        //print(valor);
        //myText.text = valor.ToString();
        NewBehaviourScript variable = GetComponent<NewBehaviourScript>();
        valorB = variable.valor3;
        myText = (TextMeshPro)GameObject.Find("caudaltmp").GetComponent<TextMeshPro>();
        myText.text = ""+Mathf.Round(valorB * 0.05440f);
        //myText.text = "" + Mathf.Round(valorB * 0.0586510f);

        valorY = valorB * 0.98f;
    }
    public void Mostrarflujo()
    {
        print(valorY);
    }
}

```

### PULSERANDOMVALUE

```

/* Distributed under the Apache License, Version 2.0.
   See accompanying NOTICE file for details.*/

using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

// Component used to generate random values and broadcast them as pulse data
[ExecuteInEditMode]
public class PulseRandomValueGenerator : PulseDataSource
{
    public float valorm;

    public text_Charger valorB;

    public float minValue = 0; // Minimum value
    public float maxValue = 100; // Maximum value
    [Range(0f, 1f)]
    public float variability = .1f; // How similar to the previous value we are
    [Range(0f, 120f)]
    public float frequency = 0; // How fast do we generate a new value
}

```

```

[SerializeField, HideInInspector]
float previousValue;           // Used with variability to get new value
float previousTime = 0;       // Used to match the requested frequency

// MARK: MonoBehaviour methods

// Called when application or editor opens
void Awake()
{
    // Create our data container
    data = ScriptableObject.CreateInstance<PulseData>();

    // Store data field names
    data.fields = new string[1] { "Random" };

    // Allocate space for data times and values
    data.timeStampList = new FloatList();
    data.valuesTable = new List<FloatList> { new FloatList() };
}

// Called at the first frame when the component is enabled
void Start()
{
    // Ensure we only generate data if the application is playing
    if (!Application.isPlaying)
        return;

    // Compute initial random value
    previousValue = Random.Range(minValue, maxValue);
}

// Called before every frame
void Update()
{
    valorm = valorB.valorY * 0.98f;
    valorB.Mostrarflujo();

    // Ensure we only generate data if the application is playing
    if (!Application.isPlaying)
        return;

    // Clear PulseData container
    data.timeStampList.Clear();
    data.valuesTable[0].Clear();

    // Only generate data at a certain frequency
    var time = Time.time;
    if (frequency > 0 && time < previousTime + 1 / frequency)
        return;

    // Update time and compute data value
    previousTime = time;
    //previousValue = GenerateRandomValue();
    previousValue = valorm * 0.07040f;
    // Broadcast data
    data.timeStampList.Add(previousTime);
    data.valuesTable[0].Add(previousValue);
}

// MARK: Custom methods

// Generate a random value
float GenerateRandomValue()

```

```

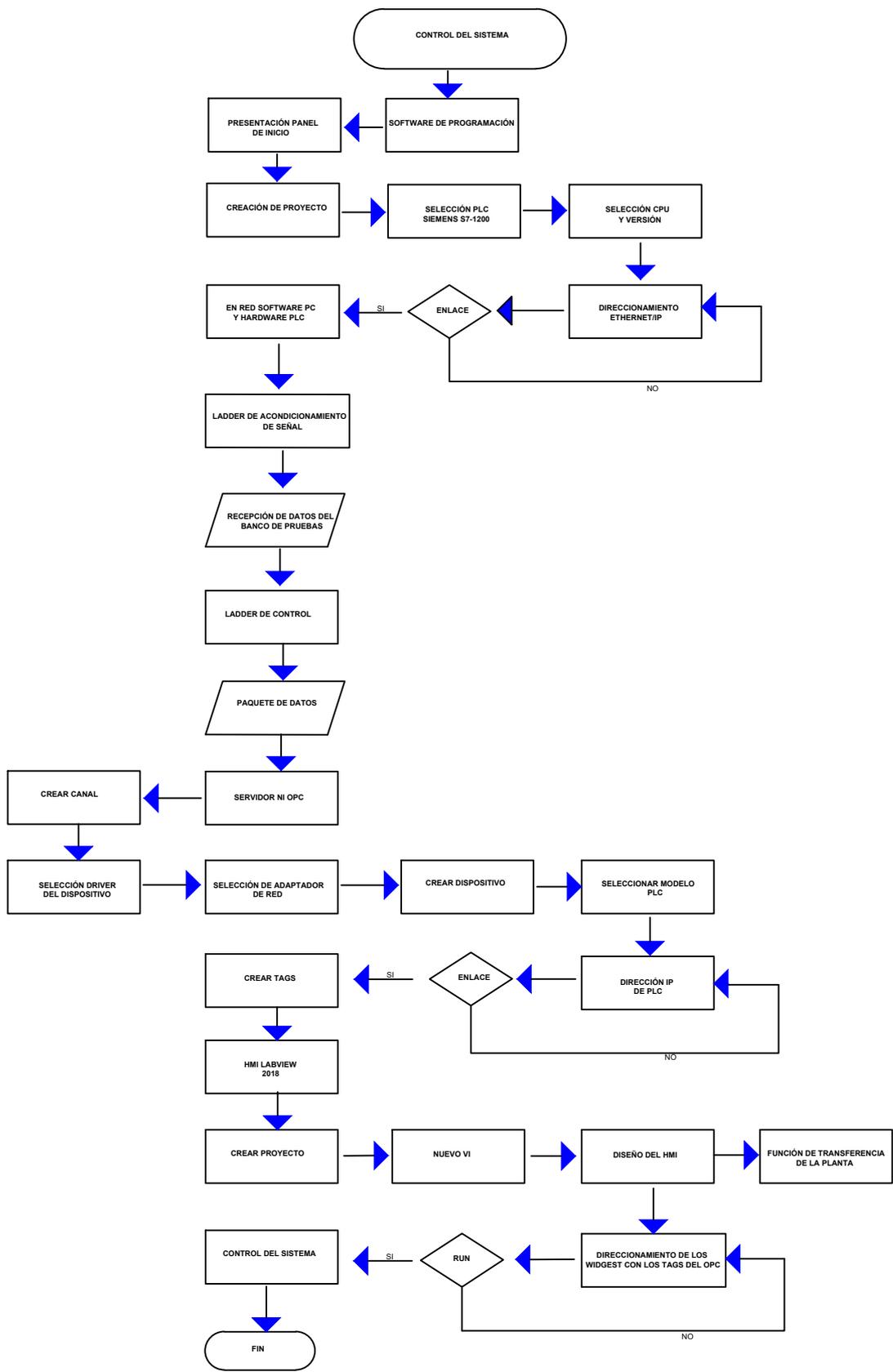
{
  var val = Random.Range(minValue, maxValue);
  val = variability * val + (1 - variability) * previousValue;
  previousValue = val;
  return val;
}
}

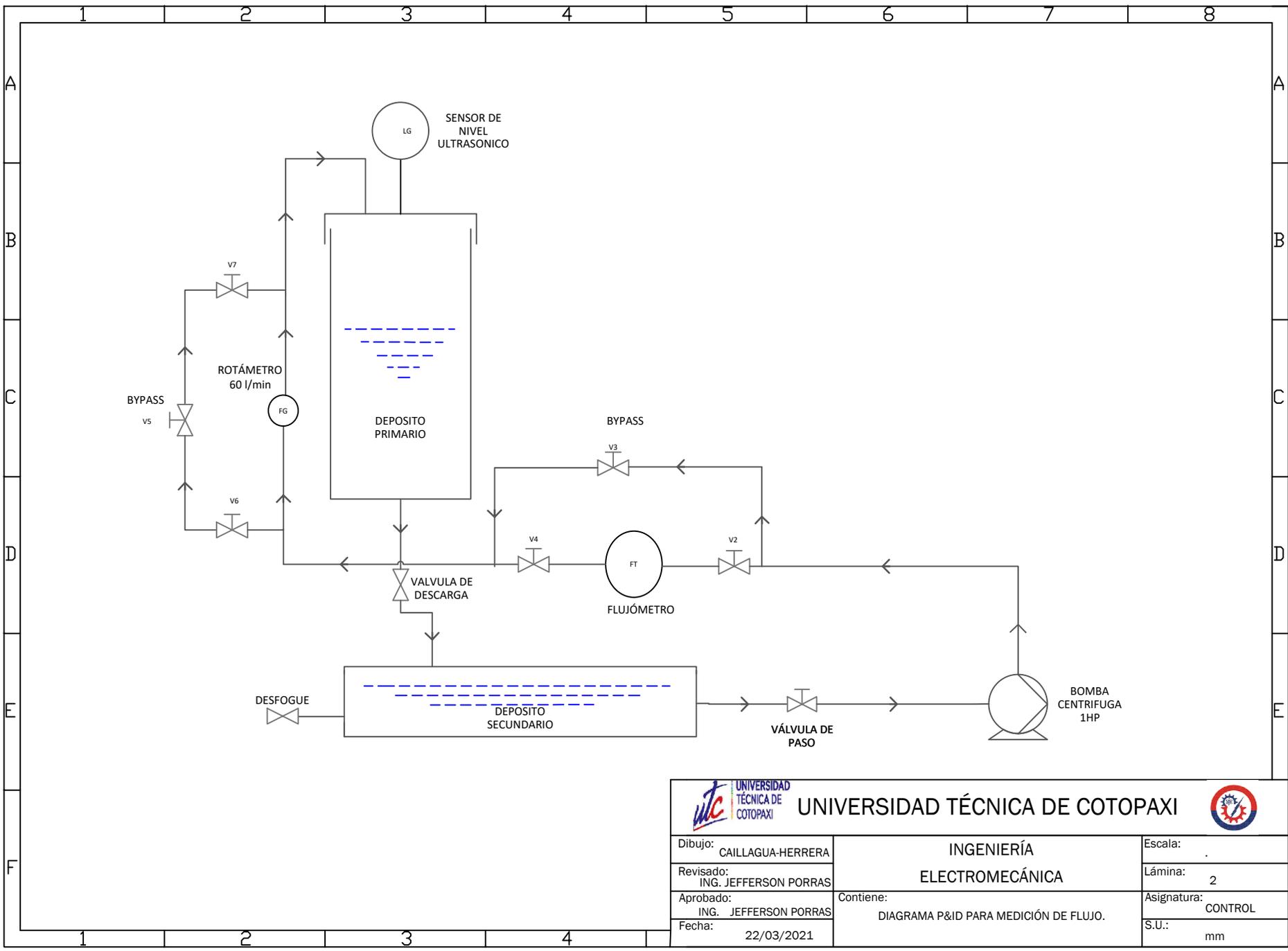
```

	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>	
<b>ANEXOS</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>12</b>

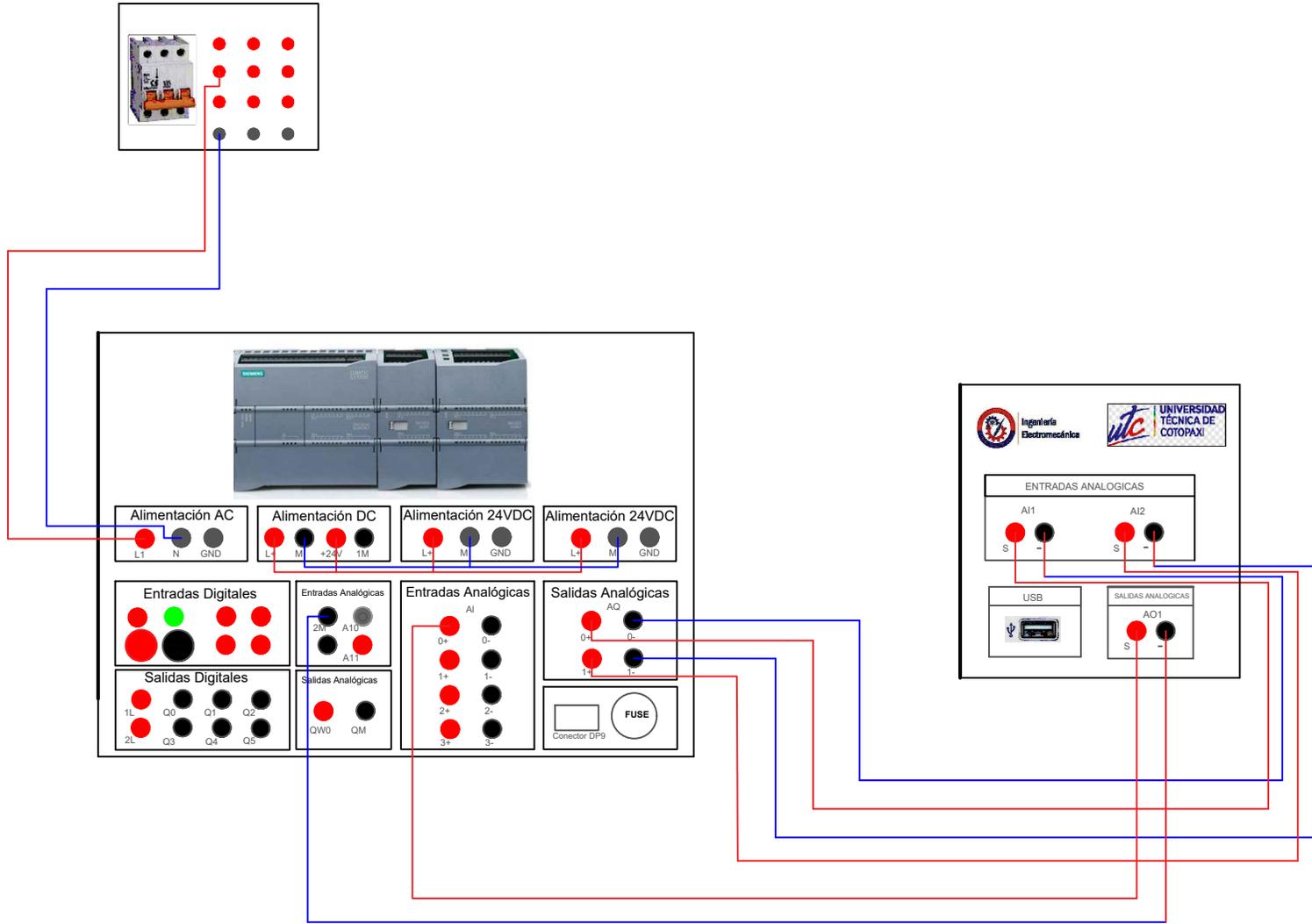
**Tabla 7. Salarios mínimos en el Ecuador 2020**

Cargo/ Actividad	Estructura Ocupacional	Código IESS	Salario mínimo sectorial 2020
<b>INGENIERO ELECTRÓNICO ESPECIALISTA EN MANTENIMIENTO</b>	B2	1220030000001	430,60
<b>TÉCNICO EN SEGURIDAD ELECTRÓNICA</b>	C2	1220000000010	427,81
<b>MECÁNICO DE MANTENIMIENTO / ELECTROMECAÁNICO</b>	C2	1104341000011	413,78
<b>PROFESIONALES CON TÍTULO DE CUARTO NIVEL</b>	A1	1910000000042	440,17

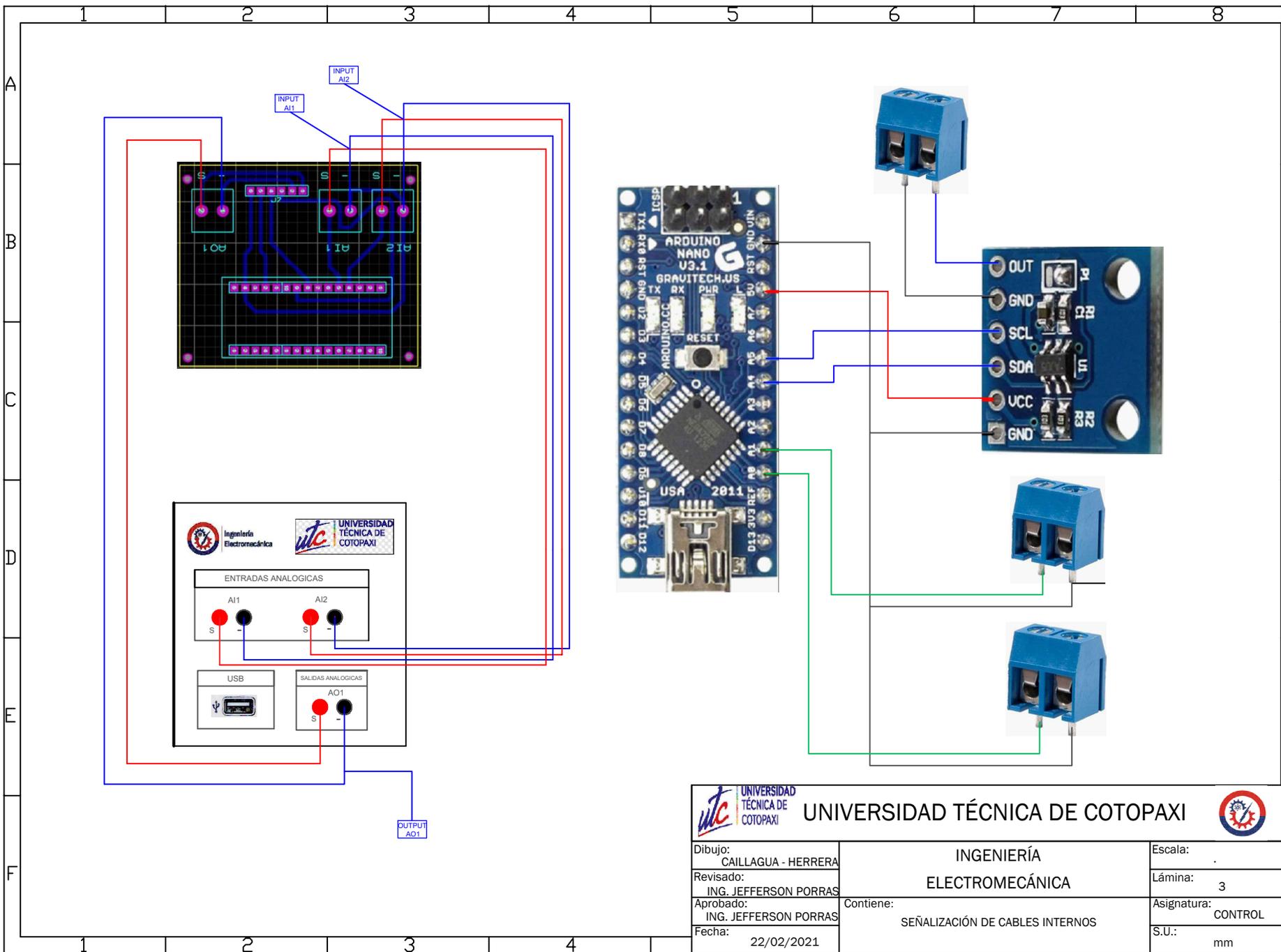




 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b> 		
Dibujo: CAILLAGUA-HERRERA	<b>INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA</b>	Escala: .
Revisado: ING. JEFFERSON PORRAS		Lámina: 2
Aprobado: ING. JEFFERSON PORRAS	Contiene: DIAGRAMA P&ID PARA MEDICIÓN DE FLUJO.	Asignatura: CONTROL
Fecha: 22/03/2021		S.U.: mm



 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>		
Dibujo: CAILLAGUA - HERRERA		Escala: ESCALA
Revisado: ING. JEFFERSON PORRAS		Hoja 1 De 1
Aprobado: ING. JEFFERSON PORRAS		Asignatura: CONTROL I.
Fecha: 22/02/2021		S.U.: UNIDADES
<b>INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA</b>		Contiene: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL SISTEMA



 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>		
<b>INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA</b>		
Dibujo: CAILLAGUA - HERRERA	Contiene: SEÑALIZACIÓN DE CABLES INTERNOS	Escala: .
Revisado: ING. JEFFERSON PORRAS		Lámina: 3
Aprobado: ING. JEFFERSON PORRAS		Asignatura: CONTROL
Fecha: 22/02/2021		S.U.: mm



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LAS INGENIERÍAS Y APLICADAS**  
**CARRERA INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE DEL CONTROL DE PROCESOS, ESTUDIO DE CASO CONTROL DE FLUJO PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.**

**Autores:**

Caillagua Cuyo Erick Javier

Herrera Bravo Cristian Daniel

**Tutor Tesis:**

Ing. Porras Jefferson

**Latacunga – Ecuador**

**Marzo 2021**

# GUÍAS DE LABORATORIO

## PRÁCTICA DE LABORATORIO

CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA	IELM804	MEDIDAS ELÉCTRICAS E INSTRUMENTACIÓN

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	ELECTRÓNICA	DURACIÓN (HORAS)
1	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Configuración e interfaz del sistema virtual	2

1	OBJETIVO
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar el hardware de los componentes utilizados</li> <li>• Configurar la comunicación del sistema HMI con el software de programación.</li> </ul>

2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
	<p><b>2.1. INTRODUCCIÓN</b></p> <p><b>TIA Portal.-</b> es un software que integra todos los componentes de las máquinas para controlar procedimientos y operaciones. Al ser una aplicación es modular, es posible añadir nuevas funcionalidades que se adapten a las necesidades de la aplicación.</p> <p>Es ideal para hardware que utilizan el S7-1200 y S7-1500. Es una realidad que los nuevos paneles funcionan mejor con este programa. Además, se obtiene una fácil migración de los proyectos con sistemas ya existentes.</p> <p><b>LabView.-</b> es un software que proporciona un potente entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias a un lenguaje de programación sin la complejidad de otras herramientas de desarrollo.</p>

**OPC server.-** es una tecnología de comunicación con una arquitectura de cliente y servidor. Una aplicación actúa de servidor proporcionando datos y otra actúa como cliente leyéndolos o manipulándolos.

OPC es, con mucha diferencia, la tecnología de comunicación industrial estándar. Ello permite el intercambio de información entre múltiples dispositivos y aplicaciones de control sin restricciones o límites impuestos por los fabricantes. Un servidor OPC puede estar comunicándose continuamente con los PLCs de campo, RTUs, estaciones HMI u otras aplicaciones. Aunque el hardware y el software provengan de diferentes marcas comerciales, el cumplimiento del estándar OPC posibilita la comunicación continua en tiempo real.

## **2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS**

- Software de programación del controlador PLC\_S7-1200.
- Software LabView y OPC Server.
- Sistema didáctico virtual (Unity3D)

## **.2. MEDIDAS DE SEGURIDAD**

Los estudiantes deberán tener todas las precauciones y seguridades socializadas al inicio del ciclo con respecto al uso de los laboratorios.

Los estudiantes deberán tener conocimientos teóricos básicos antes de la configuración de los dispositivos.

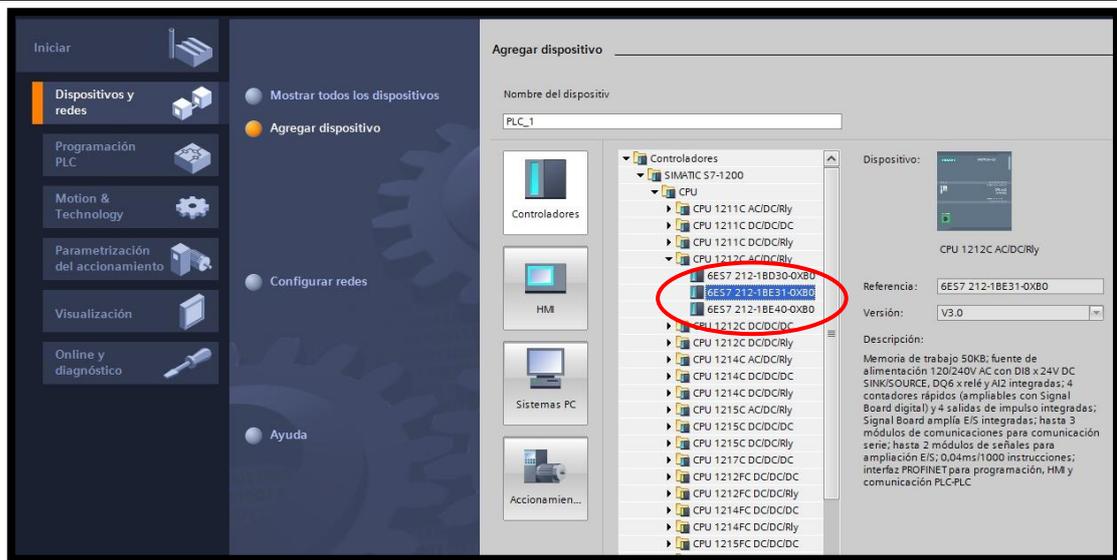
**IMPORTANTE:** Para la configuración es necesario verificar las versiones correctas de los componentes e instrumentos a configurar.

## **.3. PROCEDIMIENTO**

### **1. Configuración de hardware**

Para poder realizar la programación del PLC S7-1200 se utilizó el software de programación de SIEMENS. Para ingresar los bloques de programa se debe crear la configuración del dispositivo del PLC que se va a utilizar de acuerdo a la versión del CPU, posteriormente seleccionamos los módulos de entradas y salidas analógicas el módulo de entradas y salidas analógicas y se procede a crear el Ladder como se muestra en la figura (1.1).

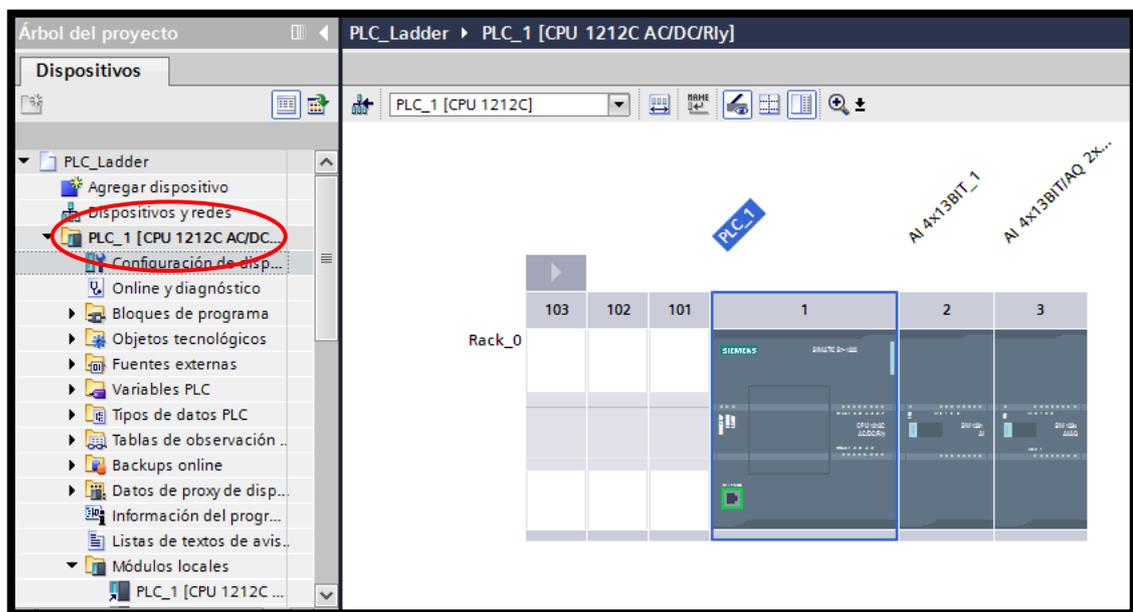
Nota: En el caso de la versión de firmware correspondiente al CPU que se tiene en el laboratorio es 6ES7 212-1BE31-0XBO



**Figura 1.1.** Selección de una CPU.

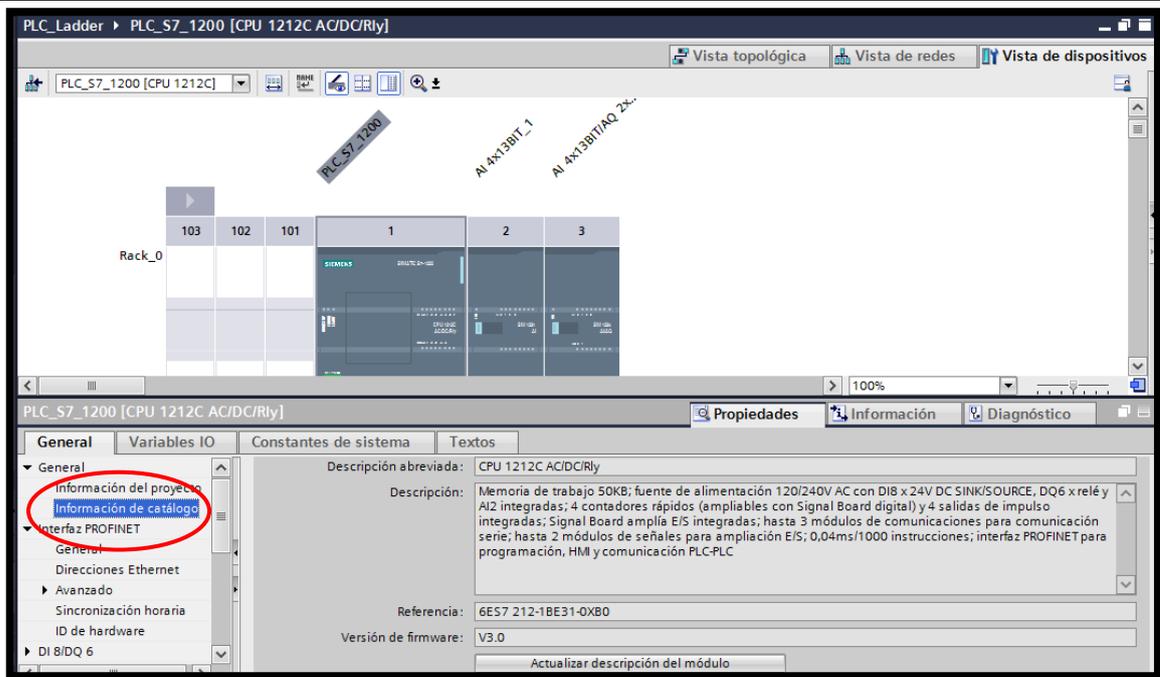
**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Para saber que CPU se está utilizando o saber el modelo exacto de Hardware, se debe seleccionar la CPU donde se desplegara una ventana de propiedades de la CPU. A continuación, escogemos la opción de “Información de Catalogo” y se podrá observar los datos de la CPU utilizada, desde la referencia de SIEMENS al Firmware utilizado. Otro método se puede abrir la sección de “Configuración de dispositivos” y seleccionar la pestaña de “Vista de dispositivos”.



**Figura 1.2.** Configuración de dispositivos.

**Fuente:** Software de programación de Siemens.



**Figura 1.3.** Información de Catálogo.

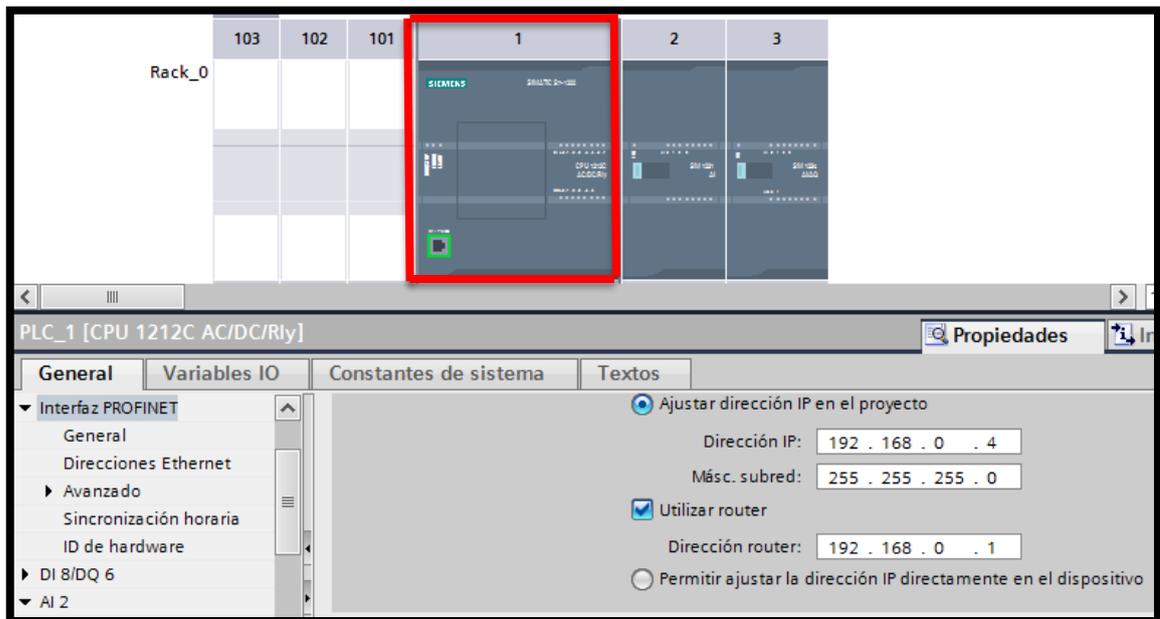
**Fuente:** Software de programación de Siemens.

A continuación configuramos la dirección IP para la comunicación del PLC con el software Tia Portal.

**Dirección IP del PLC:** 192.168.0.4

Se debe tomar en cuenta que la dirección IP del computador debe estar en el rango de 0 a 100 para una correcta comunicación por ejemplo:

**Dirección IP del computador:** 192.168.0.10



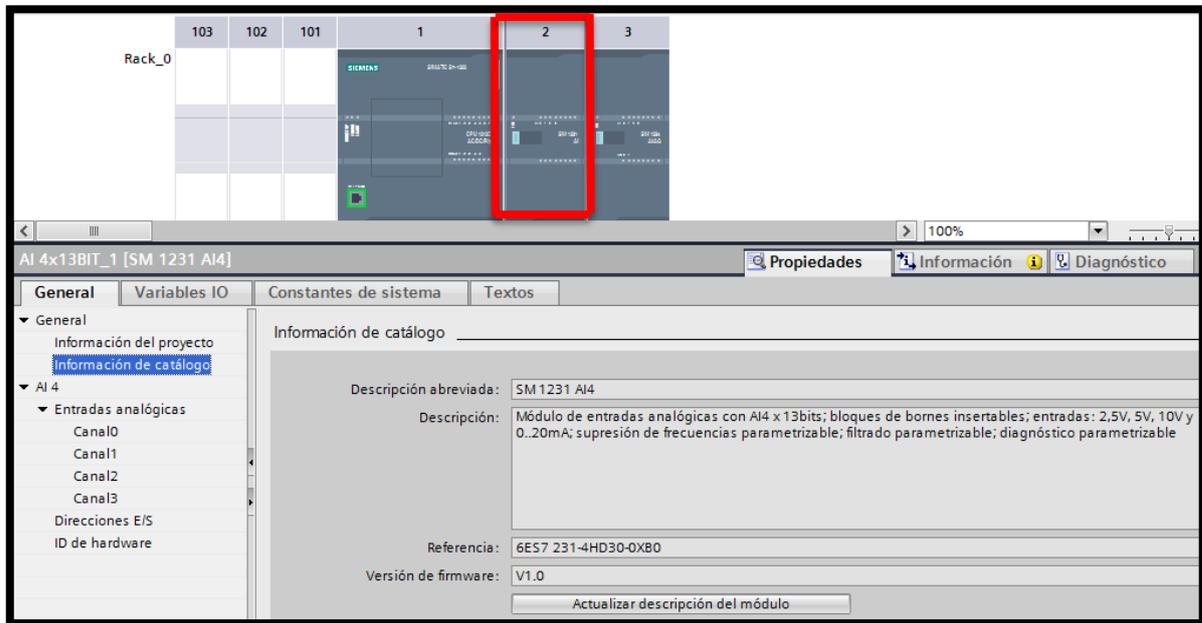
**Figura 1.4.** Configuración de la dirección IP.

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Procedemos a seleccionar el módulo **SM\_1231\_AI4** de entradas analógicas y revisamos que la numeración de la referencia coincida con la del módulo físico.

**Referencia:** 6ES7 231-4HD30-0XB0

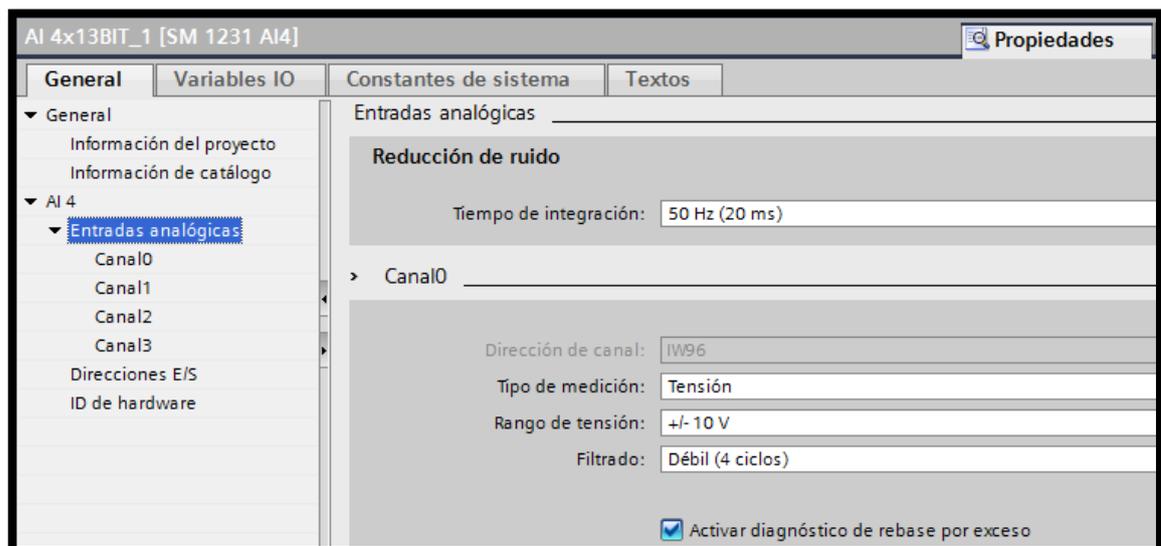
**Versión de firmware:** V1.0



**Figura 1.5.** Información de módulo seleccionado (in).

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Seguimos con la configuración de entradas analógicas en todos los canales correspondientes con un rango de tensión de +/- 10v y filtrado de 4 ciclos.



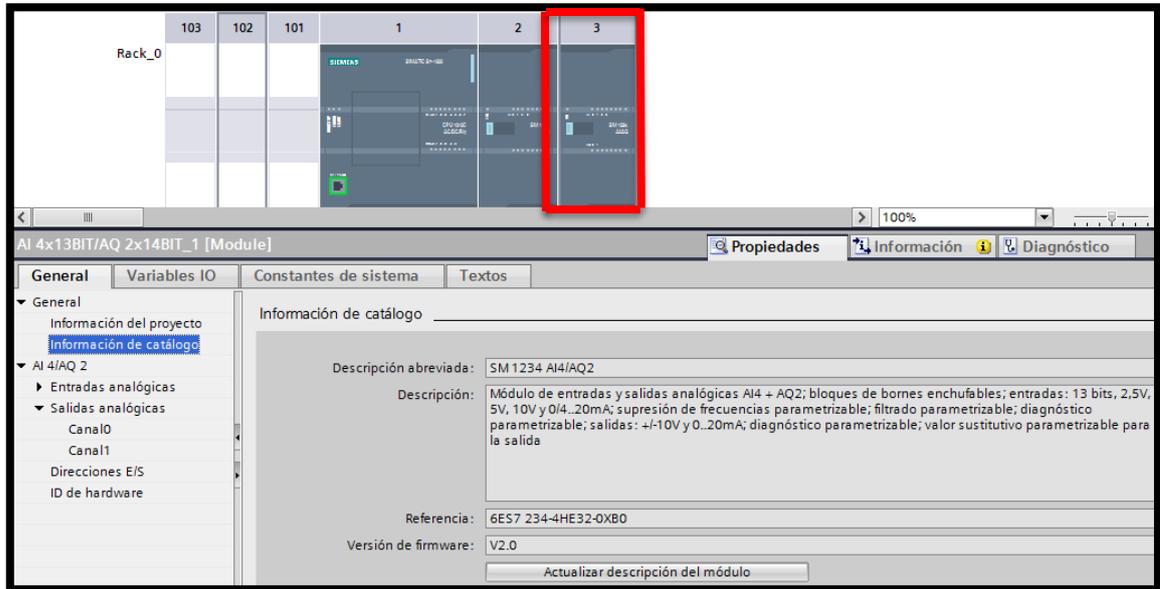
**Figura 1.6.** Configuración de las entradas analógicas.

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Procedemos a seleccionar el módulo **SM\_1234\_AI4/AQ2** de salidas y entradas analógicas y revisamos que la numeración de la referencia coincida con la del módulo físico.

**Referencia:** 6ES7 234-4HE32-0XB0

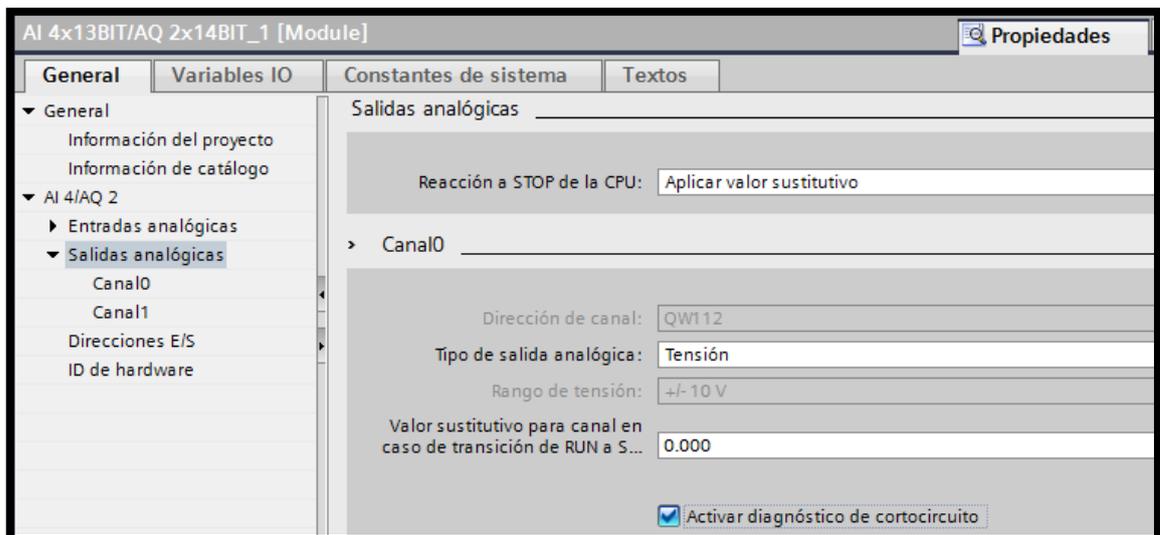
**Versión de firmware:** V2.0



**Figura 1.7.** Información de modulo seleccionado (out).

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

Seguimos con la configuración de salidas analógicas en todos los canales correspondientes con un rango de tensión de +/- 10v.

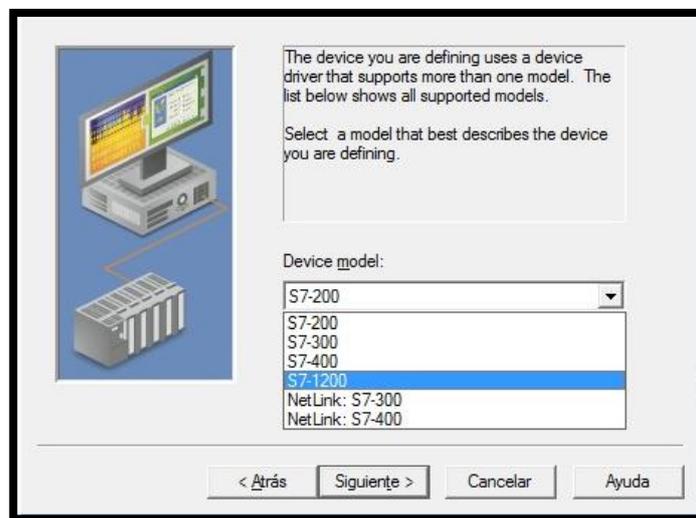


**Figura 1.6.** Configuración de las salidas analógicas.

**Fuente:** Software de programación de Siemens.

## 2. Configuración del OPC

Existen varios servidores OPC como los Matrikon, National Instruments y el más conocido KEPServer, de tal manera se trabajara con el OPC National Instruments el cual sirven para enlazar las variables del PLC con la Interfaz Gráfica de Usuario en LabVIEW, se requiere disponer de un servidor OPC, que su función principal es la comunicación entre el controlador y el cliente OPC, que es el HMI en el computador, por ende, se envía una señal escalón que pueda excitar al sistema con el fin de que este sea capaz de enviar una respuesta al controlador y poderla visualizar en el HMI. Para la cual se instalará el Módulo de LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (DSC). Se debe crear y configurar con el dispositivo que se requiere realizar la comunicación en este caso con el PLC S7-1200S, tomando en cuenta el protocolo vía ethernet, y de tal manera conocer la dirección del PLC (192.168.0.4) como se presenta en la siguiente imagen.



**Figura 2.1.** Configuración de la interfaz de Comunicación.

**Fuente:** NI OPC

Una vez establecido los parámetros es necesario crea los tags con las direcciones de las memorias para cada uno de las variables del PLC, para ello se trabaja con la variable del sensor y las variables del CV y PV, como se puede ver en la figura (2.2).

Variables PLC								
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	OUT_sensorFlujo	Tabla de variabl...	Int	%QW112	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	OUT_salidaControl	Tabla de variables e..	Int	%QW114	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Start_HMI	Tabla de variables e..	Bool	%M300.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Stop_HMI	Tabla de variables e..	Bool	%M300.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Act_Proceso_Indicador	Tabla de variables e..	Bool	%M300.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	PV	Tabla de variables e..	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	SP	Tabla de variables e..	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	CV	Tabla de variables e..	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	CVaux	Tabla de variables e..	Real	%MD24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	SalidaSP	Tabla de variables e..	Int	%IW96	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	EntradaSP	Tabla de variables e..	Real	%MD36	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	<Agregar>				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 2.2.** Creación de tags para las variables del PLC.

**Fuente:** NI OPC.

### 3. Interfaz del sistema

- PASO 1: Se crea un channel, se configura con el nombre, modelo del controlador y su dirección IP.

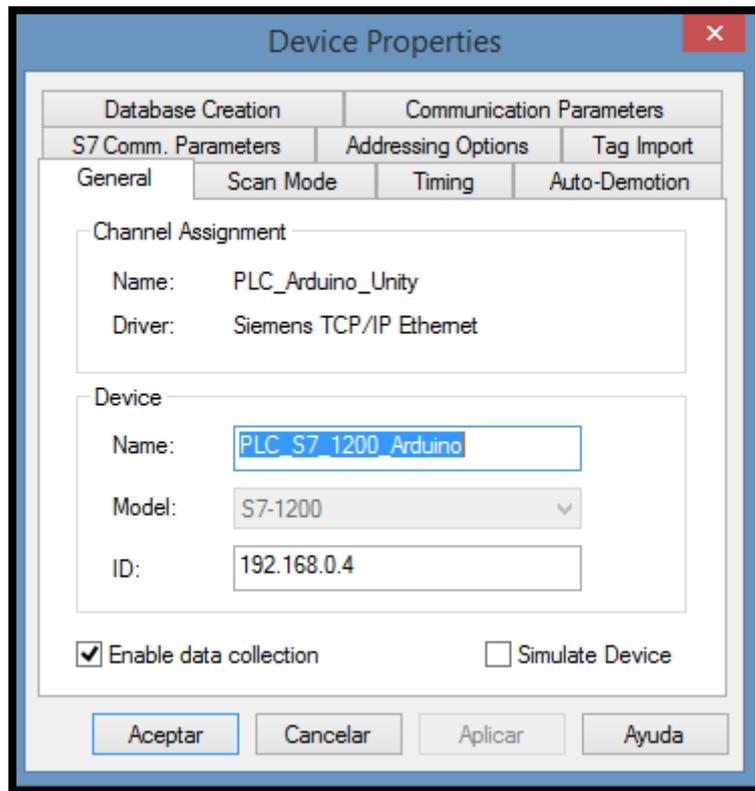


Figura 3.1. Configuración de activación de canal.

- PASO 2: Asignación de las variables a utilizar en el NI OPC Server de acuerdo a las programadas en el software TIA Portal.

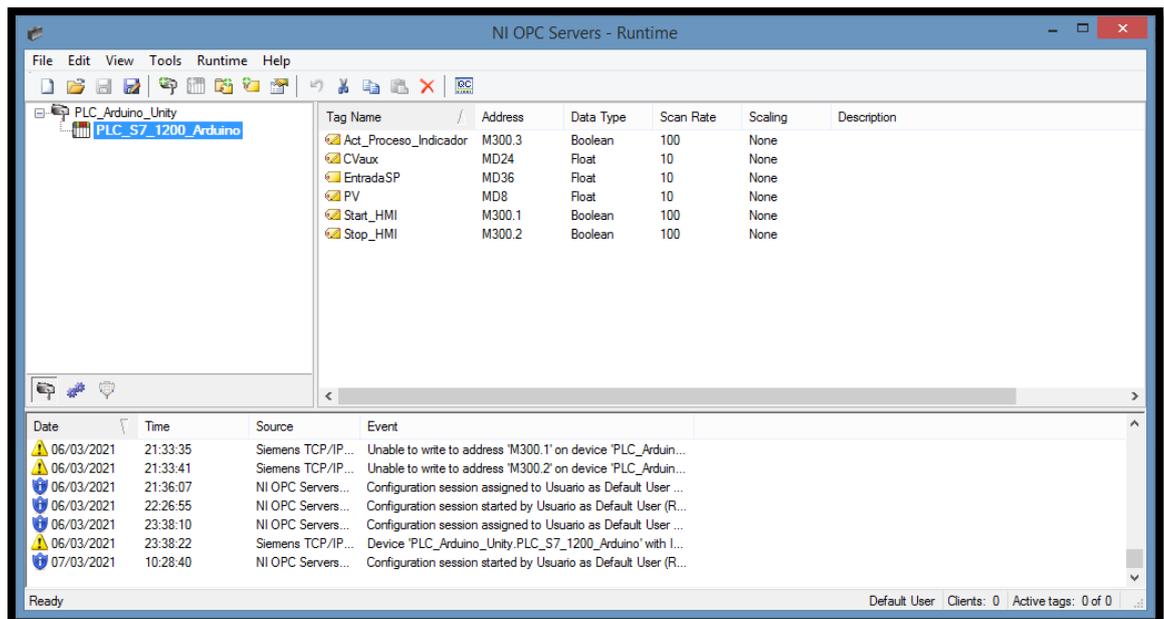
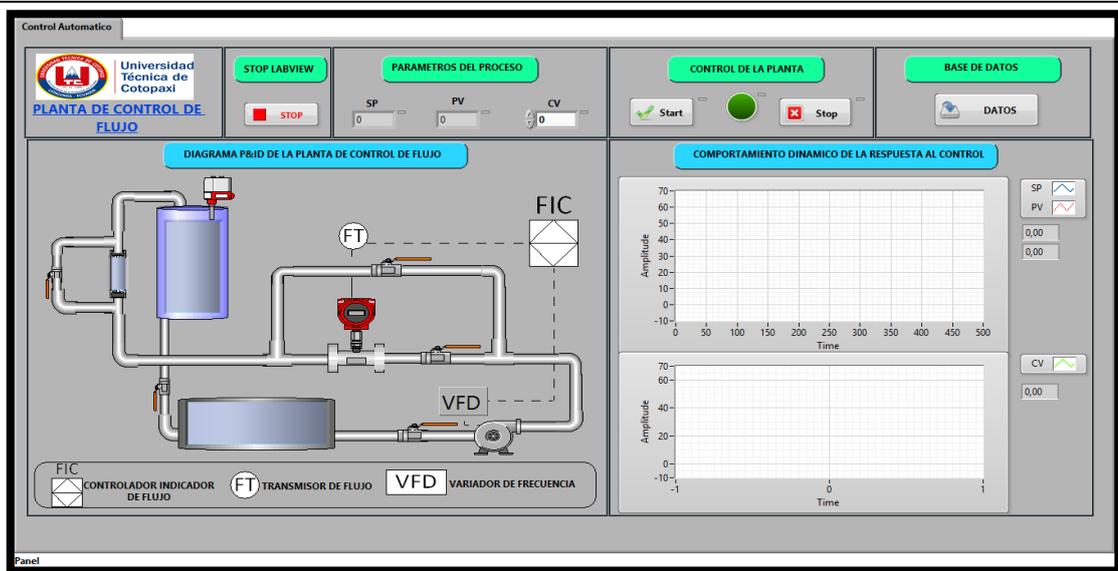


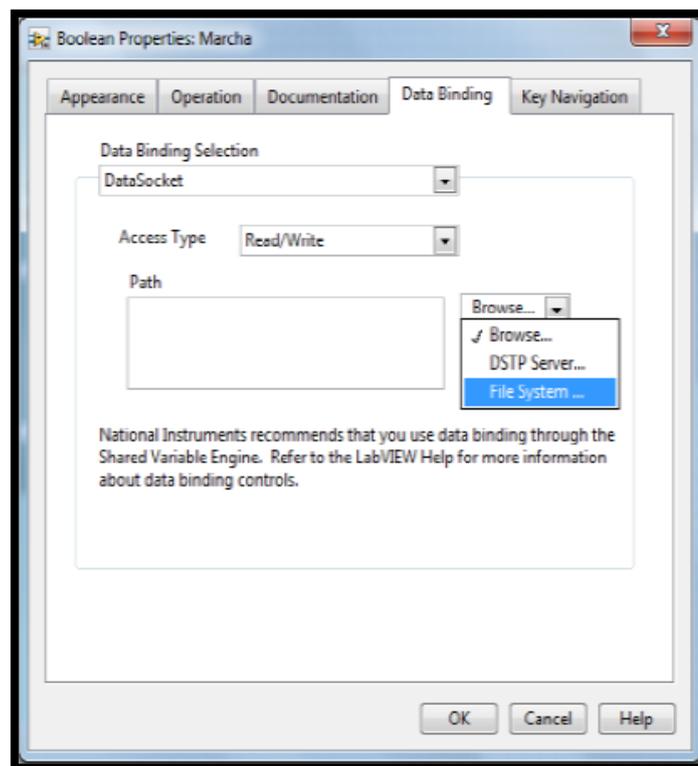
Figura 3.2. Configuración de variables en NI OPC Server.

- PASO 3: Diseño de la pantalla HMI para la visualización y el monitoreo del proceso.



**Figura 3.3.** Diseño del HMI (Sistema SCADA).

- PASO 4: Configuración para la comunicación del sistema HMI con el OPC Server y el software de programación del PLC.



**Figura 3.4.** Configuración del ingreso de variables en el HMI.

<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b>
<p>La siguiente practica permitió interactuar con la configuracion del controlador PLC_S7_1200 y sus modulos de entradas y salidas analogicas por lo que se puede concluir que se adquiere conocimiento practica para poder configurar cualquier otro tipo de controlador o de diferente version.</p>	

<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>
<p>Se debe seleccionar bien los equipos y las versiones que se esta utilizando de lo contrario no habra comunicacion de la PC con el controlador.</p>	

<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<p><a href="https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html">https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html</a>  <a href="https://www.kepserverexopc.com/comunicaci%C3%B3n%20industrial%20est%C3%A1ndar">https://www.kepserverexopc.com/comunicaci%C3%B3n%20industrial%20est%C3%A1ndar</a>  <a href="https://www.autycom.com/tia-portal.html">https://www.autycom.com/tia-portal.html</a></p>		
		
<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>		
<b>PRÁCTICA DE LABORATORIO</b>		

CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA	IELM804	MEDIDAS ELÉCTRICAS E INSTRUMENTACIÓN

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	ELECTRÓNICA	DURACIÓN (HORAS)
2	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Programación del controlador (PLC)	2

<b>1</b>	<b>OBJETIVO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Instruir al estudiante en el uso del software de programación TIA PORTAL V14 y determinar sus características y su aplicación en el campo de la instrumentación.</li> </ul>	

- Diseñar un sistema que permita utilizar las herramientas NORM\_X y SCALE\_X para visualizar las señales analógicas ya con valores escalados.

## 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

#### **NORM\_X: Normalizar**

La instrucción «Normalizar» normaliza el valor de la variable de la entrada VALUE representándolo en una escala lineal. Los parámetros MIN y MAX sirven para definir los límites de un rango de valores que se refleja en la escala.

#### **SCALE\_X: Escalar**

La instrucción «Escalar» escala el valor de la entrada VALUE mapeándolo en un determinado rango de valores. Al ejecutar la instrucción «Escalar», el número en coma flotante de la entrada VALUE se escala al rango de valores definido por los parámetros MIN y MAX. El resultado de la escala es un número entero que se deposita en la salida OUT.

#### **PID-Compact**

Registra de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna deseada. A partir del error de regulación resultante, la instrucción PID\_Compact calcula un valor de salida, con el que el valor real se iguala con la consigna con la máxima rapidez y estabilidad. En los reguladores PID, el valor de salida se compone de tres acciones:

- **Acción P**

La acción P del valor de salida aumenta proporcionalmente al error de regulación.

- **Acción I**

La acción I del valor de salida aumenta hasta que se compensa el error de regulación.

- **Acción D**

La acción D aumenta con una velocidad de variación creciente del error de regulación. El valor real se iguala lo más rápidamente posible con la consigna. Si la velocidad de variación del error de regulación vuelve a reducirse, también lo hace la acción D.

La instrucción PID\_Compact calcula los parámetros P, I y D para su sistema regulado de forma autónoma durante la optimización inicial. Los parámetros pueden optimizarse aún más a través de una optimización fina. No es necesario determinar los parámetros manualmente.

## 2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- PC con los software de TIA Portal V14
- PLC\_S7-1200
- Sistema didáctico virtual (Unity3D)
- Multímetro

## 2.2.MEDIDAS DE SEGURIDAD

Los estudiantes deberán tener todas las precauciones y seguridades socializadas al inicio del ciclo con respecto al uso de los laboratorios.

Los estudiantes deberán tener todas las precauciones y seguridades socializadas al inicio del ciclo con respecto al uso de los laboratorios.

**IMPORTANTE:** Para la programación se debe tomar en cuenta el rango de la numeración entre memorias según el proceso a realizar.

## 2.3.PROCEDIMIENTO

### 1. Programación en el software TIA Portal

Establecer las variables de entrada y de salida a utilizar en la programación y declararlas en la tabla de variables del PLC como se puede observar en la siguiente figura.

	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	sensorFlujo	Tabla de variables estándar	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	OUT_sensorFlujo	Tabla de variables estándar	Int	%QW112	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	signalControl	Tabla de variables estándar	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	OUT_salidaControl	Tabla de variables estándar	Int	%QW114	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Emergency_Stop	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Start_HMI	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Stop_HMI	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Act_Proceso_Indicador	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Menu_Auto_HMI	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Activa_Autom	Tabla de variables estándar	Bool	%M300.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	PV	Tabla de variables estándar	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	SP	Tabla de variables estándar	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	<Agregar>				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 1.1. Variables declaradas en el PLC.

### Segmentos de programación.

- En el segmento 1 podemos visualizar la activación del sistema con un botón de inicio “Start” y un botón de apagado “Stop” también se puede apreciar el activador del proceso para un control automático. El sistema puede ser comandado desde el software de programación o de forma virtual utilizando el sistema HMI.

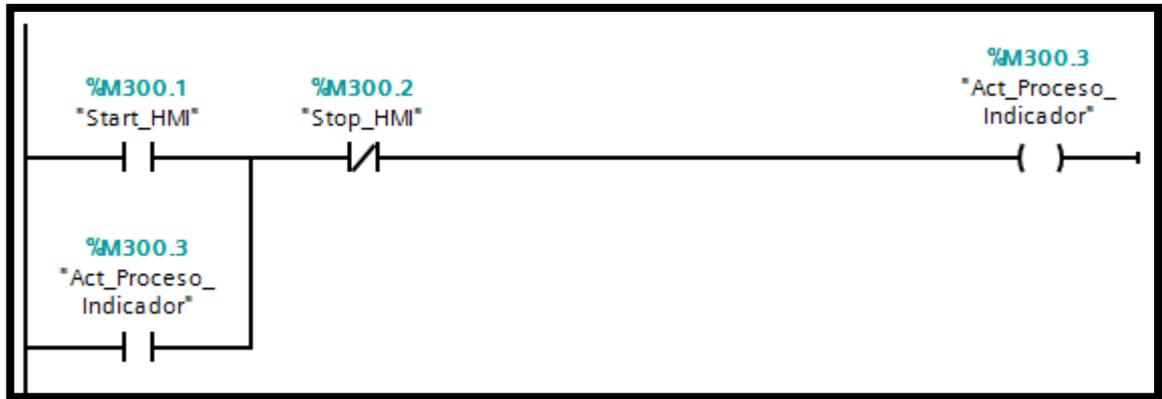


Figura 1.2. Activación del sistema.

- En el segmento 2 visualizamos las variable de salida (CV) y las variables de salida (PV) comandado con un botón de paro para el HMI “Stop” que suspende todo el sistema.

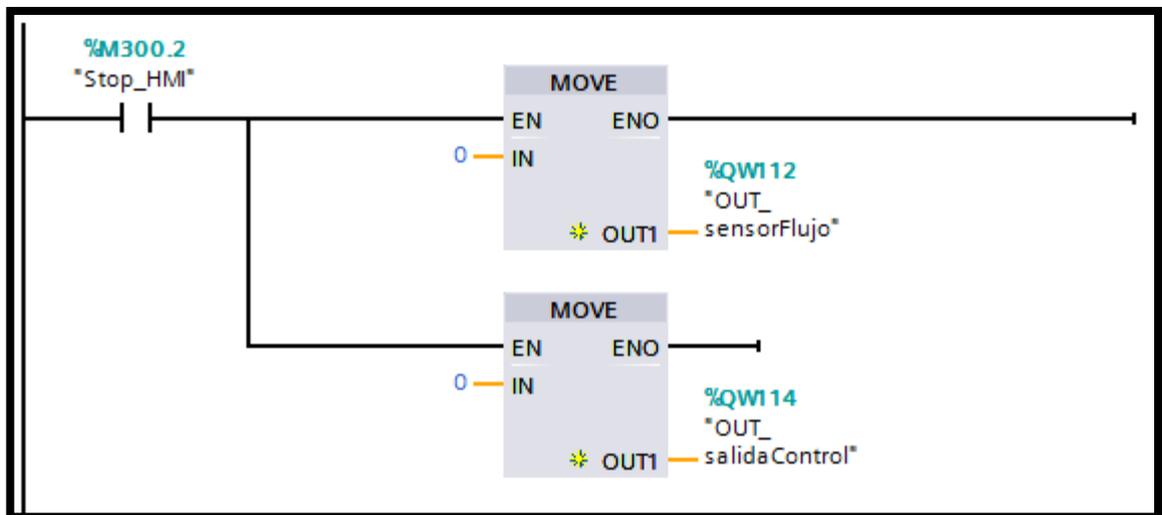


Figura 1.3. Variables programadas de entrada y salida.

- En el siguiente segmento se muestra el escalamiento de las señales analógicas del sensor de flujo. Además podemos encontrar el bloque NORM\_X y el SCALE\_X que se mencionó anteriormente. En el bloque NORM\_X adquirimos la señal que envía el transmisor de flujo en un rango de 0 a 27.649v que es con el que trabaja el controlador en un escalamiento de 0 a 10v, se debe tomar en cuenta que el sistema de flujo trabaja de 0 a 5v y en el rango que comprende el controlador sería 11.760v. El bloque

SCALE\_X será la entrada de la variable de salida del bloque anterior en donde se indica el rango de la señal de oscilación para el control del proceso.

- Como se puede observar en el siguiente grafico tenemos una entrada del set-point (SP) por el bloque NORM\_X y en la salida se puede observar la misma variable ya escalada por el bloque SCALE\_X.



Figura 1.4. Escalamiento de señales analógicas (SP).

- Como se puede observar en el siguiente grafico tenemos una entrada de la variable de proceso (PV) y la variable de control (CV) por el bloque NORM\_X y en la salida se puede observar las mismas variables ya escaladas por el bloque SCALE\_X.

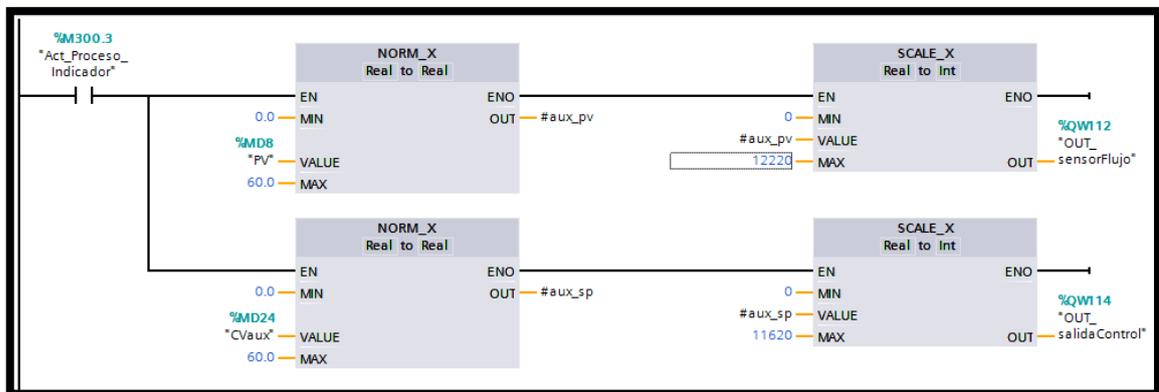


Figura 1.5. Escalamiento de señales analógicas (PV).

## 2. Configuración PID\_Compact

En el bloque PID\_Compact se puede observar que tenemos como entrada el Setpoint mediante la memoria “MD36” también tenemos una entrada de la variable PV mediante la memoria “MD8” y como salida tenemos la variable CV mediante la memoria “MD16” con el cual desarrollamos un control PID para el sistema virtual de Flujo.

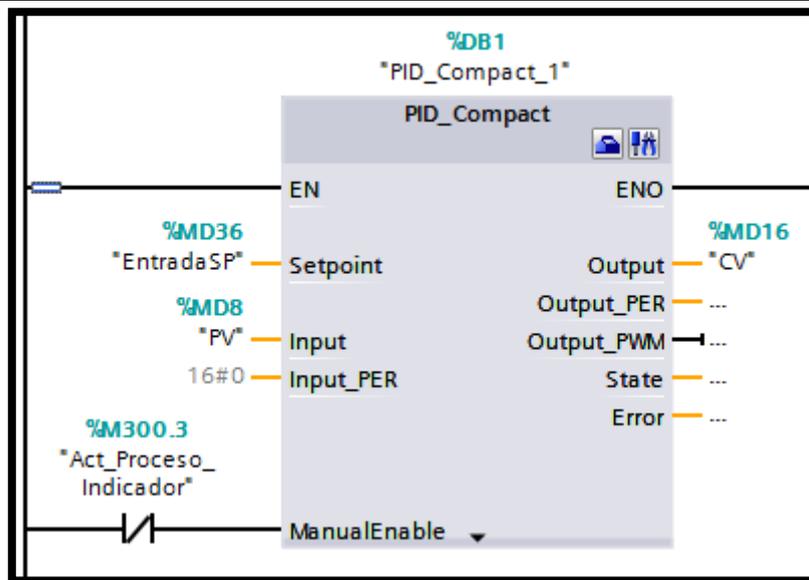


Figura 1.6. Bloque de control PID.

### 3. Sintonización del PID

Para sintonizar el PID damos click en “**Configuración**” del PID\_Compact y vamos a parámetros del PID donde plasmamos los valores de sintonización obtenidos analíticamente para el proceso, como la ganancia proporcional ( $K_p$ ), el tiempo de integración ( $T_i$ ) y el tiempo derivativo ( $T_d$ ), además se puede realizar pruebas experimentales con diferentes valores de sintonía según el método analítico utilizado y se puede observar las curvas del comportamiento de las variables de flujo según el método utilizado.

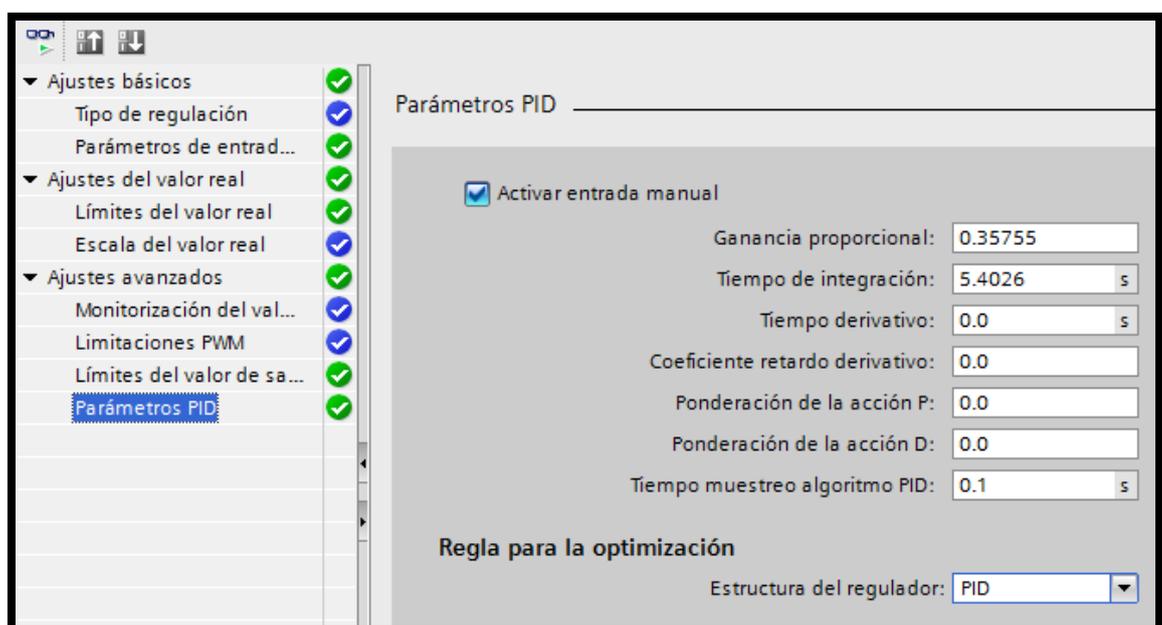


Figura 3.1. Parámetros de sintonía del PID.

<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b>
<p>Con la practica realizada se dio uso a las herramientas del Software TIA Portal V14 esto nos permite realizar una programacion optima del proceso para obtener una mejor eficiencia del sistema.</p>	

<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>
<p>Adquirir mayor conocimiento teorico para poder utilizar las herramientas de programacion que nos ofrece el software TIA Portal.</p>	

<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>
<p><a href="https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916495/v1/s71500_pid_control">https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916495/v1/s71500_pid_control</a></p> <p><a href="https://programacionsiemens.com/escalado-de-una-senal-analogica-en-tia-portal">https://programacionsiemens.com/escalado-de-una-senal-analogica-en-tia-portal</a></p>	

	<p><b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b></p>
<p><b>PRÁCTICA DE LABORATORIO</b></p>	

CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA	IELM804	MEDIDAS ELÉCTRICAS E INSTRUMENTACIÓN

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	ELECTRÓNICA	DURACIÓN (HORAS)
3	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Simulación del sistema virtual de flujo con un control PID	2

<b>1</b>	<b>OBJETIVO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Instruir al estudiante en el uso de sistemas virtuales de flujo, para determinar la variable del proceso del sistema y adquirir conocimiento práctico para su aplicación en el campo laboral.</li> </ul>	

## 2.1. INTRODUCCIÓN

### Sistemas didácticos virtuales

Los sistemas didácticos virtuales son los portadores de los contenidos digitales, los cuales deben posibilitar el aprendizaje y se convierten a su vez en transmisores del conocimiento. Los sistemas didácticos son aquellos que reúnen medios y recursos que facilitan la enseñanza y el aprendizaje. Suelen utilizarse dentro del ambiente educativo para facilitar la adquisición de conceptos, habilidades, actitudes y destrezas. Sensores tipo rodete de turbina

### Control PID

El control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada. En sistemas de bombeo, regularmente nos interesa mantener la presión o flujo constante, por lo tanto, el control PID mide la diferencia entre la presión en la tubería y la presión requerida y actúa variando la velocidad del motor para que podamos tener nuestra presión o flujo constante.

El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales: Ganancia proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D).

### Sintonización de sistemas

Sintonizar un sistema de control realimentado significa regular parámetros en el controlador para lograr implementar un control robusto en el proceso. “Robusto” en este contexto es usualmente definido como la estabilidad de las variables de procesos a pesar de los cambios de carga, una rápida respuesta ante los cambios de setpoint, oscilaciones mínimas y un offset mínimo (error entre el setpoint y la variable de proceso) en el tiempo.

## 2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- Fuente de alimentación 120/240v AC
- PLC\_S7-1200
- Tablero de interconexión entre la Planta Virtual y el PLC.
- PC con los software de TIA Portal, LabView y OPC Server
- Sistema didáctico virtual (Unity3D)
- Multímetro

## **2.4.MEDIDAS DE SEGURIDAD**

Los estudiantes deberán tener todas las precauciones y seguridades socializadas al inicio del ciclo con respecto al uso de los laboratorios.

**IMPORTANTE:** Verificar que las conexiones de los tableros a utilizar están correctas, de lo contrario esto puede producir daños a los equipos que se están utilizando.

## **2.5.PROCEDIMIENTO**

### **2.5.1. SISTEMA DIDACTICO VIRTUAL DE CONTROL DE FLUJO**

1. Verificar los elementos a utilizar en la práctica.

**PASO 1:** Seleccionar los elementos del sistema virtual que se va a utilizar para realizar la práctica mencionada.

**PASO 2:** Verificar que se encuentre desenergizado el sistema (breaker en estado OFF)

**PASO 3:** Verificar que no se encuentre conectado ningún cable en los equipos o en el panel de conexión del banco de pruebas de medición.

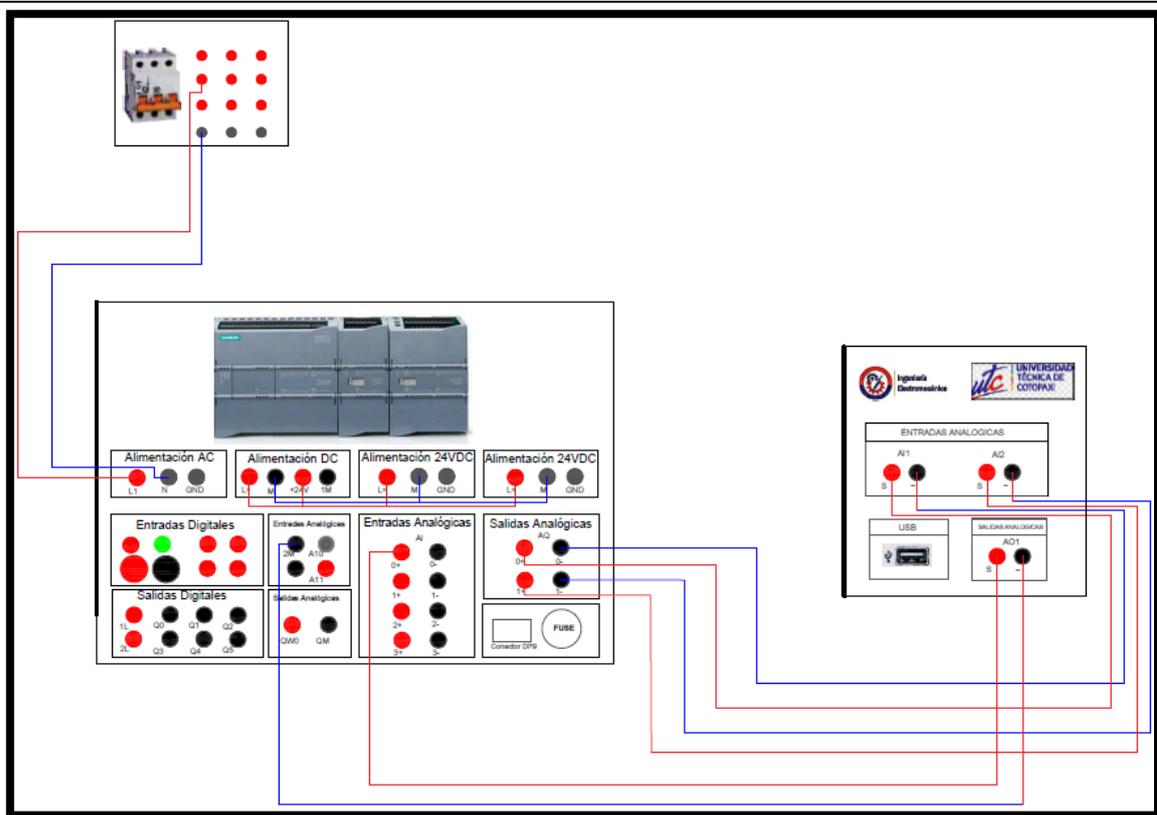
**PASO 4:** Comprobar que el fusible del tablero del PLC este operativo (Para la verificación utilizar el multímetro en la selección de continuidad).

**PASO 5:** Verificar que los cables a utilizar para la conexión estén en buenas condiciones para no ocasionar un cortocircuito.

Adjunto a esta guía práctica del diagrama de conexión de los tableros para el sistema didáctico virtual donde se muestran cada uno de los elementos y equipos que están conectados para realizar el proceso de medición.

#### **2. Conexión de tableros para el sistema didáctico virtual.**

En el diagrama de conexión del sistema didáctico virtual cuenta con la señalización específica para cada uno de los elementos y equipos a utilizar y se puede visualizar en la siguiente gráfica.



**Fig. 1:** Conexión física de los tableros para medición de Flujo.

Después de haber realizado los pasos anteriores procedemos a realizar las conexiones de acuerdo se indica en la Fig.1 siguiendo la siguiente secuencia:

**PASO 1:** Primero realizar la conexión del breaker 120/240 AC al tablero del PLC en los puertos de “Alimentación AC” (L1 Y N), como se muestra en la Fig.1. (En caso de no saber cuál es el nivel de tensión utilice un multímetro en la escala de Voltaje AC).

**PASO 2:** Después de las entradas de “Alimentación DC” ubicados debajo del PLC-S7-1200 alimentamos el modulo SM 1231 y el modulo SM 1234 (L Y M) 24 VAC como se muestra en la figura 1.

**PASO 3:** Conectar las salidas analógicas (AQ) del tablero del PLC a las entradas analógicas (AI) del tablero de interconexión.

- (0+ y 0-) al (AI1 s/-)
- (1+ y 1-) al (AI2 s/-)

**PASO 4:** Conectar las entradas analógicas (AI) del tablero del PLC a las salidas analógicas (AO) del tablero de interconexión.

- (0+ y M) al (AO1 s/-)

**PASO 5:** Conectar el cable USB del tablero de interconexión al computador con la planta virtual en Unity3D.

**PASO 6:** Por ultimo conectamos el cable Ethernet del PLC\_S7\_1200 al computador con el programador TIA Portal V14.

**PASO 7:** Una vez realizado secuencialmente estos pasos y luego de verificar cada una de las conexiones, procedemos a realizar el encendido del sistema, esto se lo realiza energizando el mismo (breaker en estado ON).

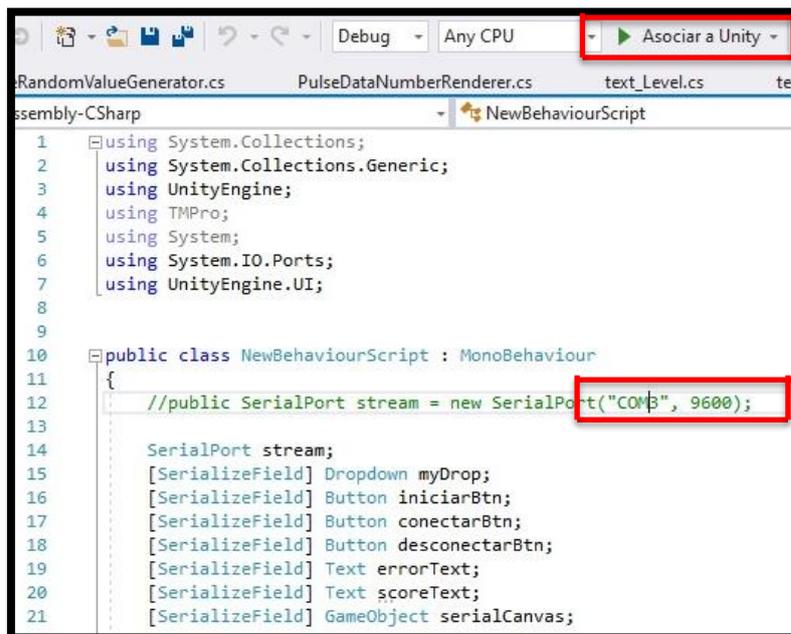
### 3. Habilitación de las plataformas virtuales

**PASO 1:** Encender la PC con los software instalados para el funcionamiento de la planta virtual de flujo.

#### ➤ Unity3D

**PASO 2:** Abrir el archivo ejecutable de la “Planta virtual de flujo” en Unity3D

**PASO 3:** Seleccionar el puerto COM que se va a utilizar para la comunicación serial entre la planta virtual y el tablero de Interconexión. (Ingresar al script “NewBehaviour”, Luego en la línea 12 de la programación seleccionamos el puerto COM a utilizar y por ultimo damos click en “Asociar a Unity” como se puede observar en la figura 2, (y minimiza la pantalla).



```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4 using TMPro;
5 using System;
6 using System.IO.Ports;
7 using UnityEngine.UI;
8
9
10 public class NewBehaviourScript : MonoBehaviour
11 {
12     //public SerialPort stream = new SerialPort("COM3", 9600);
13
14     SerialPort stream;
15     [SerializeField] Dropdown myDrop;
16     [SerializeField] Button iniciarBtn;
17     [SerializeField] Button conectarBtn;
18     [SerializeField] Button desconectarBtn;
19     [SerializeField] Text errorText;
20     [SerializeField] Text scoreText;
21     [SerializeField] GameObject serialCanvas;
```

**Fig. 2:** Selección del puerto COM.

**PASO 4:** A continuación en la barra superior seleccionamos “play” y esperamos q cargue el programa, luego damos click en conectar y por ultimo maximizamos la pantalla para visualizar las animaciones y las variables del proceso.

#### ➤ TIA PORTAL V14

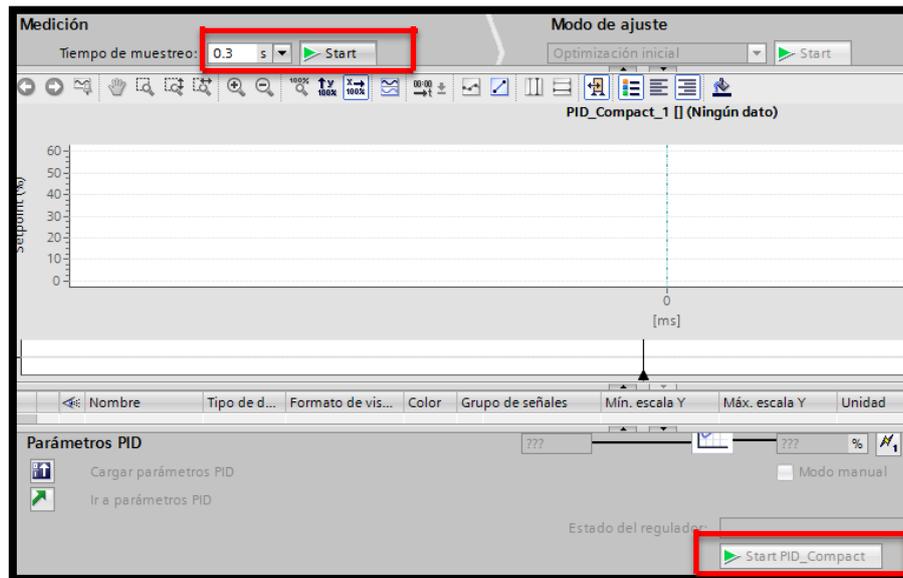
**PASO 5:** Abrir el archivo “PLC\_OPC\_Labview” click en “PLC\_Ladder\_PID”

**PASO 6:** Seleccionar “Vista de proyecto”

**PASO 7:** Dirigirse a la pestaña “Bloques de programa”

**PASO 8:** Click en “PID\_LABVIEW\_UNITY” , luego en el bloque PID\_Compact seleccionamos “Configuración” y “Puesta en servicio”

**PASO 9:** En la ventana Puesta en servicio Click en “Start” y en “Start PID\_Compact” para dar inicio a la simulación.



**Fig. 3:** Inicio de la simulación.

➤ **LABVIEW**

**PASO 10:** Abrir el archivo ejecutable “HMI\_Control\_Monitoreo”

**PASO 11:** Click en “Run”

**PASO 12:** Después dar click en “Start” para accionar el control automático de la planta virtual

**PASO 13:** Dar valores al set-point y visualizar el funcionamiento de la planta virtual.

**2.5. TRABAJO PREPARATORIO**

1.- Una vez realizadas las conexiones adecuadas de la planta virtual de flujo y todos los componentes a utilizar procedemos a realizar las simulaciones correspondientes dando valores de entrada (Set-point) para obtener la variable de salida (PV) y visualizar las curvas correspondientes de las variables del sistema.

**2.6. ACTIVIDADES A DESARROLLAR**

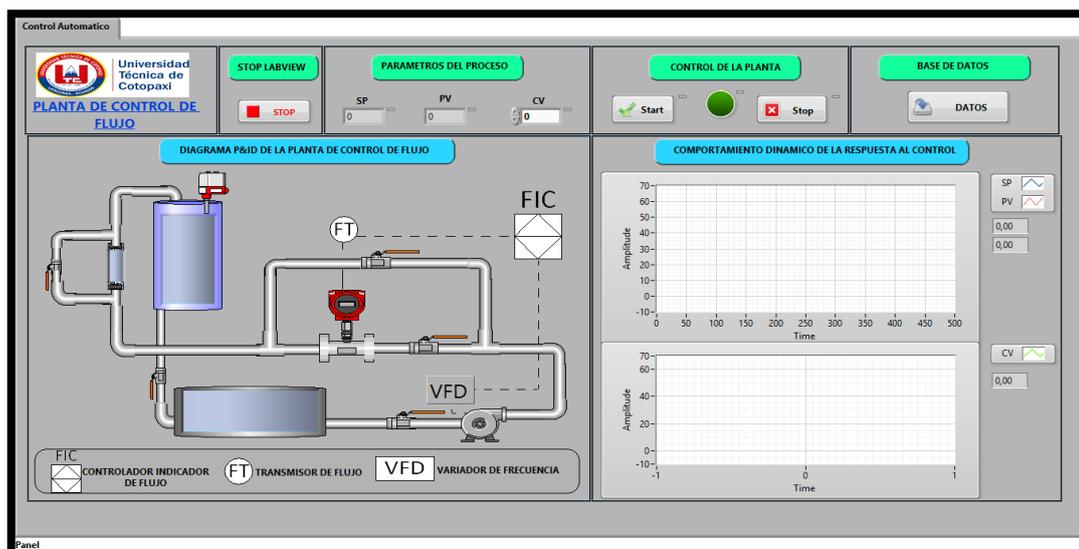
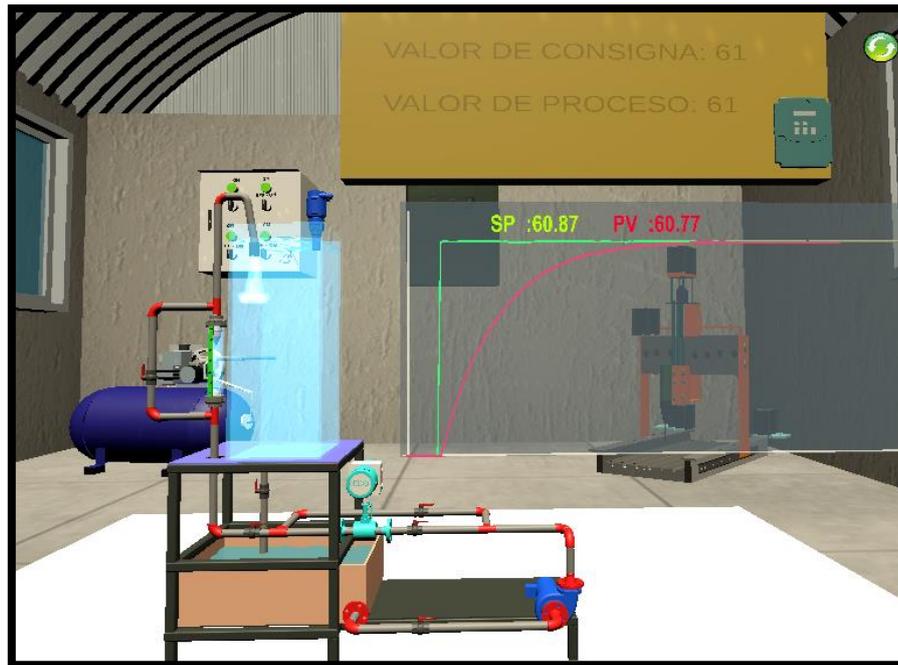
Con los datos dados en el trabajo preparatorio llene la siguiente tabla

Frecuencia	Flujo (l/min)	Voltaje (v)
0		
21.28		
24.34		
30.46		
36.52		
42.64		
48.7		
54.82		

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

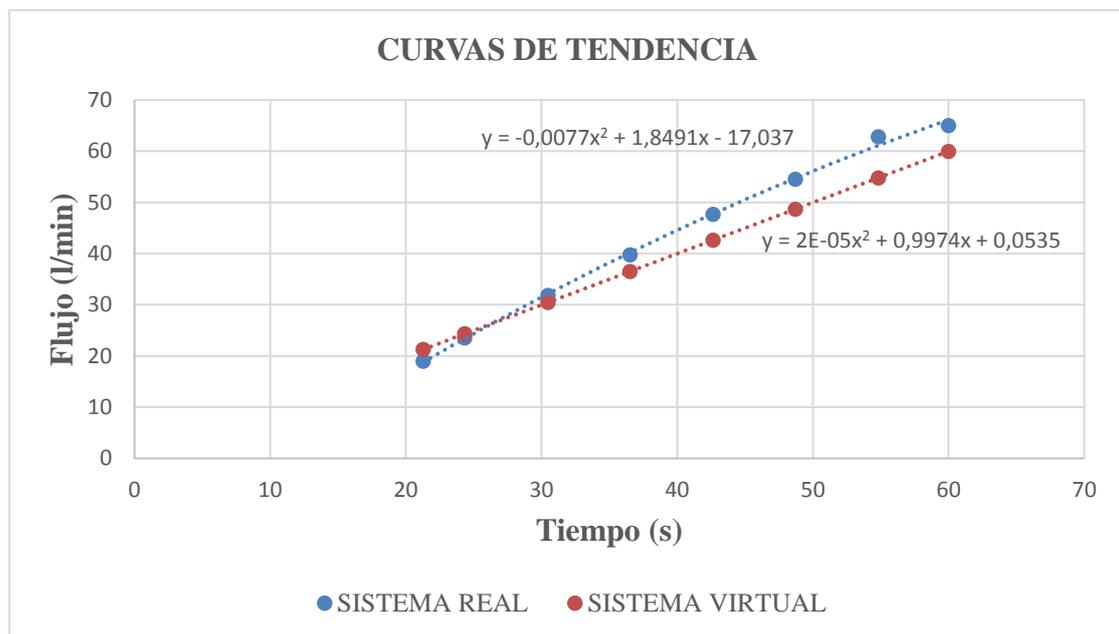
Para la validación de los resultados presentamos graficas de las curvas de las variables de flujo, la medición del voltaje y la simulación de la planta virtual.



Los valores obtenidos son

Frecuencia	Flujo (l/min)	Voltaje (v)
0	0	0
21.28	21.26	1.56
24.34	24.31	1.79
30.46	30.46	2.24
36.52	36.51	2.69
42.64	42.6	3.13
48.7	48.67	3.58
54.82	54.81	4.03
60	59.97	4.42

Una vez obtenidas varias medidas, realizar curvas de comportamiento del nivel en los tiempos utilizados.



**Análisis:** La siguiente curva muestra el comportamiento que tiene un sensor de flujo al variar la frecuencia a la que trabaja la bomba se toma la medida de flujo y el voltaje del sensor y se puede observar que la curva virtual tiene una mejor estabilidad que la real.

4	<b>CONCLUSIONES</b>
<p>Con el sistema virtual de control de flujo se puede observar que se puede realizar las practicas correspondientes de control de flujo y se puede notar la diferencia entre la planta real y virtual.</p> <p>Se observó la importancia de la instrumentación ya que permite analizar y medir variables físicas que existen en diferentes procesos con equipos aplicados en la industria.</p>	

5	<b>RECOMENDACIONES</b>
<p>Verificar que las conexiones de los tableros a utilizar estén correctas, de lo contrario esto puede producir daños a los equipos que se están utilizando.</p> <p>Antes de hacer uso de los equipos utilizados pedir una guia tecnica a los docente que imparten la materia</p>	

6	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>
<p><a href="http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0257-aprendizaje">http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0257-aprendizaje.</a></p> <p><a href="https://franklinlinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/">https://franklinlinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/</a></p> <p><a href="https://instrumentacionycontrol.net/introduccion-a-la-sintonizacion-de-controladores-conociendo-a-los-procesos-primero/">https://instrumentacionycontrol.net/introduccion-a-la-sintonizacion-de-controladores-conociendo-a-los-procesos-primero/</a></p>	