



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE E/S  
CON UN AMBIENTE VIRTUAL QUE PERMITA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE DIAGRAMA ESCALERA Y SISTEMAS  
DE CONTROL EN ESTACIONES INDUSTRIALES SIMULADAS,  
PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN  
LATACUNGA.**

**AUTORES:**

**BARBERÁN MUÑOZ, JUAN CARLOS**

**ILLESCAS FIERRO, FRANCISCO XAVIER**

**DIRECTOR:**

**ING. GORDÓN GARCÉS, ANDRÉS MARCELO**

**LATACUNGA**

**2019**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE E/S CON UN AMBIENTE VIRTUAL QUE PERMITA LA IMPLEMENTACIÓN DE DIAGRAMA ESCALERA Y SISTEMAS DE CONTROL EN ESTACIONES INDUSTRIALES SIMULADAS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”* realizado por los señores **Barberán Muñoz, Juan Carlos e Illescas Fierro, Francisco Xavier** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, julio del 2019

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrés Gordón', written over a horizontal line.

Ing. Andrés Gordón  
C.C.: 1803698800



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA


AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Barberán Muñoz, Juan Carlos** e **Illescas Fierro, Francisco Xavier**, declaro que el contenido, ideas, y criterios del trabajo de titulación: *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE E/S CON UN AMBIENTE VIRTUAL QUE PERMITA LA IMPLEMENTACIÓN DE DIAGRAMA ESCALERA Y SISTEMAS DE CONTROL EN ESTACIONES INDUSTRIALES SIMULADAS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA* es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, julio del 2019

Firma:

  
Juan Carlos Barberán Muñoz

C.C.: 0804158749

Firma:

  
Francisco Xavier Illescas Fierro

C.C.: 0504341421



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA


CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Barberán Muñoz, Juan Carlos** y **Illescas Fierro, Francisco Xavier** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE E/S CON UN AMBIENTE VIRTUAL QUE PERMITA LA IMPLEMENTACIÓN DE DIAGRAMA ESCALERA Y SISTEMAS DE CONTROL EN ESTACIONES INDUSTRIALES SIMULADAS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”***, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Latacunga, julio del 2018**

Firma:

  
\_\_\_\_\_  
Juan Carlos Barberán Muñoz

C.C.: 0804158749

Firma:

  
\_\_\_\_\_  
Francisco Xavier Illescas Fierro

C.C.: 0504341421

## DEDICATORIA

*Dedico el presente trabajo primero a Dios que siempre es bueno para con nosotros.*

*A mi mamá Vivien Muñoz y mi abuelita Laura Martínez, sin ellas nada de esto hubiera sido posible, siempre han estado pendiente de mí y me han apoyado más allá de lo que cualquiera lo hubiera hecho.*

*A mi hermano Héctor que siempre ha estado a mi lado y me ha dado siempre la mano y mi a hermana Darlene.*

*A mis mejores amigos Cristian Maldonado, Iván Barona y Esteban Coronel que siempre estuvieron apoyándome, dándome ánimos y consejos cada día.*

*A mi profesor y amigo Ing. Patricio Navas, que siempre creyó en mis habilidades, por el apoyo y la confianza que me ha dado.*

*Por último, se cumplió este objetivo, con dedicación, constancia y esfuerzo con mi compañero de tesis, con la confianza de que se podrá cumplir más metas en el futuro.*

*A todos ustedes muchas gracias por creer en mí, quedo en deuda toda mi vida con ustedes.*

**Juan Barberán**

## DEDICATORIA

*Dedico esta investigación primero a Dios, quien me ha dado la vida, salud y guiado en los momentos difíciles, por brindarme sabiduría para tomar decisiones y continuar con mi vida profesional.*

*A mis abuelitos Rebeca y Alonso, quienes desde pequeño me apoyaron, criaron, enseñando valores y responsabilidades, su amor y esfuerzo brindado en todo momento fue fundamental para la meta cumplida.*

*A mis padres Francisco y Elizabeth por el amor, confianza, apoyo incondicional y sacrificio que hacen por sus hijos, que gracias a sus consejos y sobre todo comprensión, supieron encaminarme y alentarme a cada instante.*

*A mis hermanos Andrés y Mauricio, por ayudarme y alegrarme en todo momento, confío en que seré un ejemplo a seguir para que cumplan sus metas.*

*A todos mis familiares gracias por sus alientos y apoyo quienes a pesar de la distancia estuvieron presentes en cada etapa de mi vida.*

*A mis amigos quienes desde el inicio de la carrera mostraron que a pesar de cualquier diferencia o inconveniente son leales, confiables, apoyándonos en las buenas y en las malas creando así una amistad verdadera y sincera en especial a Pame, Scar, Kevin, David, Paúl, Alejo, Diego. A las personas importantes que igualmente estuvieron a mi lado durante la carrera por aportar con consejos, sumando alegrías y momentos compartidos.*

*A mi amigo Bismar por haber compartido su amistad, tiempo y sé que no estaría en esta etapa sin sus consejos, apoyo, pero en especial por alentarme y demostrar que era capaz de lograr lo que me proponga, este logro es suyo también.*

*Por último, se cumplió este objetivo, con dedicación, constancia y esfuerzo con mi compañero de tesis, con la confianza de que se podrá cumplir más metas en el futuro.*

**Francisco Illescas**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos de todo corazón a cada una de las personas que estuvieron presentes alentándonos a cada instante en la realización de este proyecto.

A todos los docentes por compartir sus conocimientos y experiencias de trabajo aportando en nuestra vida profesional, personal con ética y compromiso.

A nuestro tutor, Ing. Andrés Gordón por sus consejos, guía, aporte de conocimientos, asesoría y apoyo incondicional durante la elaboración de este proyecto.

A todos nuestros amigos por su amistad sincera, apoyarnos de buena voluntad, por su ayuda y constancia que se ha evidenciado en el transcurso de la carrera.

Por último y no menos importante a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L por acogernos y formado como Ingenieros Mecatrónicos, nos llena de satisfacción el haber formado parte de este establecimiento ya que con mucho esfuerzo dedicación y constancia se logró cumplir un sueño.

**Juan y Francisco**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN ..... i

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD ..... ii

AUTORIZACIÓN ..... iii

DEDICATORIA ..... iv

AGRADECIMIENTO..... vi

ÍNDICE DE CONTENIDOS ..... vii

ÍNDICE DE TABLAS ..... xi

ÍNDICE DE FIGURAS ..... xii

RESUMEN ..... xvi

ABSTRACT ..... xvii

### CAPÍTULO I

#### FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Antecedentes ..... 1

1.2. Planteamiento del problema ..... 2

1.3. Justificación e importancia..... 3

1.4. Objetivos ..... 4

1.4.1. Objetivo General ..... 4

1.4.2. Objetivos específicos..... 5



1.5.	Hipótesis.....	5
1.6.	Variables.....	5
1.7.	Realidad Virtual .....	6
1.7.1.	Características de la Realidad Virtual .....	7
1.7.2.	Arquitectura de la RV .....	12
a.	Componentes Hardware .....	12
b.	Componentes Software .....	14
1.7.3.	Sistemas de la RV .....	15
1.7.4.	Entorno Virtual.....	18
1.8.	Controlador Lógico Programable.....	19
1.8.1	Unidad de entrada/salida .....	21
1.8.2	Programación PLC .....	22
1.9.	Hardware in The Loop .....	23
1.9.1	Componentes de software del sistema HIL.....	24
a.	Software operativo .....	24
b.	Software en tiempo real.....	25

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN**

2.1.	Análisis del problema.....	27
2.2.	Selección de estaciones a virtualizar .....	28

2.3.	Diseño CAD de las estaciones .....	31
2.4.	Diseño Electrónico del módulo de E/S .....	34
2.5.	Cálculos.....	42
2.6.	Conexiones eléctricas.....	44
2.6.1.	Conexión digital entre PLC y Módulo de E/S.....	45
2.6.2.	Conexión USB entre computador y Módulo de E/S .....	46
2.6.3.	Conexión ModBus TCP entre PLC y Módulo de E/S.....	46

### **CAPÍTULO III**

#### **CONFIGURACIÓN VIRTUALIZACIÓN Y COMUNICACIÓN DE INTERFACES**

3.1.	Modelado de sensores y actuadores del sistema .....	48
3.2.	Estimación del modelo matemático de la estación real.....	51
3.3.	Combinar el modelado matemático con el entorno virtual .....	52
3.4.	Programación de algoritmos para la animación del entorno .....	53
3.5.	Programación de la comunicación del entorno virtual con el módulo de E/S ...	53
3.6.	Implementación del software final.....	53
3.7.	Configuración del cliente Modbus TCP en TIA Portal.....	54
3.9.	Diseño de controlador de Lógica Difusa dentro de un PLC Siemens .....	66

### **CAPÍTULO IV**

#### **PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS**

4.1.	Pruebas de adquisición de señales del módulo de E/S .....	71
------	---	----

4.2.	Pruebas del PLC con el ambiente virtual .....	71
4.3.	Pruebas de comunicación MODBUS TCP.....	71
4.4.	Pruebas finales.....	72
4.5.	Análisis e interpretación de resultados encuesta .....	77
4.6.	Resultados de la Encuesta .....	78
4.7.	Discusión de Resultados.....	84
4.8.	Validación de la hipótesis .....	84

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1.	Conclusiones .....	89
5.2.	Recomendaciones.....	90

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....**

**92**

### **ANEXOS .....**

**96**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Comparación entre microcontroladores</i> .....	35
<b>Tabla 2</b> <i>Selección de controladores</i> .....	35
<b>Tabla 3</b> <i>Comparación entre módulos de interfaz Ethernet con comunicación SPI</i> .....	36
<b>Tabla 4</b> <i>Selección de módulos de interfaz Ethernet</i> .....	37
<b>Tabla 5</b> <i>Protocolos de comunicación USB</i> .....	38
<b>Tabla 6</b> <i>Selección de protocolos de comunicación USB</i> .....	38
<b>Tabla 7</b> <i>Comparativa de dispositivos para salidas y entradas</i> .....	39
<b>Tabla 8</b> <i>Selección de elementos de conmutación</i> .....	39
<b>Tabla 9</b> <i>Parámetros eléctricos del optoacoplador</i> .....	42
<b>Tabla 10</b> <i>Registros de Modbus</i> .....	55
<b>Tabla 11</b> <i>Dificultad al usar el módulo de E/S</i> .....	78
<b>Tabla 12</b> <i>Experiencia de uso del módulo de E/S con las estaciones industriales</i> .....	79
<b>Tabla 13</b> <i>Calificación del módulo de E/S con las estaciones industriales</i> .....	80
<b>Tabla 14</b> <i>Implementar diagramas escalera y sistemas de control en estaciones</i> .....	81
<b>Tabla 15</b> <i>Refuerzo de conocimientos</i> .....	82
<b>Tabla 16</b> <i>Recomendaciones del Proyecto</i> .....	83
<b>Tabla 17</b> <i>Pruebas realizadas</i> .....	86
<b>Tabla 18</b> <i>Cálculo del Chi-cuadrado</i> .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Realidad Virtual .....	7
<b>Figura 2.</b> Inmersivo .....	7
<b>Figura 3.</b> Semi-inmersivo .....	8
<b>Figura 4.</b> No inmersivo.....	8
<b>Figura 5.</b> Sistema VIVE Pro Eye VR .....	10
<b>Figura 6.</b> Visor de juegos OCULUS Rift S .....	10
<b>Figura 7.</b> Controladores Oculus Touch .....	11
<b>Figura 8.</b> Simulador de entrenamiento VORTEX.....	11
<b>Figura 9.</b> Redbird FMX.....	12
<b>Figura 10.</b> Periféricos de entrada.....	13
<b>Figura 11.</b> Periféricos de salida .....	13
<b>Figura 12.</b> Software AUTOCAD PLANT 3D.....	14
<b>Figura 13.</b> Software Matlab.....	14
<b>Figura 14.</b> Software UNITY 3D.....	15
<b>Figura 15.</b> Sistema de Escritorio .....	16
<b>Figura 16.</b> Realidad Virtual en segunda persona.....	17
<b>Figura 17.</b> Sistemas de telepresencia.....	17
<b>Figura 18.</b> Sistemas de inmersión RV .....	18
<b>Figura 19.</b> Entorno Virtual .....	19
<b>Figura 20.</b> Ejemplos PLC .....	20
<b>Figura 21.</b> Hardware de un PLC.....	21
<b>Figura 22.</b> Ejemplo de un HIL de un sistema de frenado hidráulico para aviones.....	24

<i>Figura 23.</i> Esquema de las funciones de control en Simulink.....	25
<i>Figura 24.</i> Ejemplo de modelo dinámico .....	26
<i>Figura 25.</i> Flujo de procesos de la estación de distribución.....	29
<i>Figura 26.</i> Flujo de procesos de la planta de nivel .....	30
<i>Figura 27.</i> Ambiente virtual digital electro-neumático .....	32
<i>Figura 28.</i> Esquema del ambiente virtual digital electro-neumático.....	32
<i>Figura 29.</i> Ambiente virtual de la estación analógica (Tanque de 100m <sup>3</sup> ).....	33
<i>Figura 30.</i> Diagrama P&ID de la estación analógica .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Figura 31.</i> PCB del Módulo de E/S .....	41
<i>Figura 32.</i> PCB fabricada del módulo de E/S .....	41
<i>Figura 33.</i> Diseño de la carcasa del módulo de E/S .....	42
<i>Figura 34.</i> Carcasa fabricada en impresión 3D del módulo de E/S.....	42
<i>Figura 35.</i> Diagrama eléctrico de configuración .....	43
<i>Figura 36.</i> Resistencia con respecto al tiempo del optoacoplador.....	44
<i>Figura 37.</i> Conector 24 pines hembra IEEE 488.....	45
<i>Figura 38.</i> Cable SysLink MPS Festo .....	45
<i>Figura 39.</i> Placa del Módulo de E/S.....	46
<i>Figura 40.</i> Puerto USB tipo B del Módulo de E/S .....	46
<i>Figura 41.</i> Puerto Ethernet del Módulo de E/S .....	47
<i>Figura 42.</i> Conexión UDP.....	49
<i>Figura 43.</i> Comunicación USB HID .....	50
<i>Figura 44.</i> Datos transferidos a través de Modbus TCP.....	50
<i>Figura 45.</i> Comunicación bidireccional entre el ambiente virtual y el PLC .....	50
<i>Figura 46.</i> Ejemplo de estimación de un modelo matemático en Simulink .....	52

<b>Figura 47.</b> Creación del proyecto en TIA Portal .....	55
<b>Figura 48.</b> Asignar una dirección IP a la estación .....	56
<b>Figura 49.</b> Configurar una red TCP .....	57
<b>Figura 50.</b> Tipo de conexión TCP .....	57
<b>Figura 51.</b> Configuración TCP .....	58
<b>Figura 52.</b> Asignación de IP al servidor Modbus TCP .....	58
<b>Figura 53.</b> Configuración ID local .....	59
<b>Figura 54.</b> Configuración del puerto interlocutor .....	60
<b>Figura 55.</b> Bloques de Comunicación Modbus TCP .....	61
<b>Figura 56.</b> Parámetros del bloque Modbus TCP .....	61
<b>Figura 57.</b> Valores del bloque de datos de configuración Modbus TCP .....	62
<b>Figura 58.</b> Bloque de organización de alarma cíclica .....	63
<b>Figura 59.</b> Instrucción PID dentro de TIA Portal .....	63
<b>Figura 60.</b> Bloque PID dentro del diagrama escalera del bloque cíclico .....	64
<b>Figura 61.</b> Muestreo de señales del bloqueo PID .....	65
<b>Figura 62.</b> Sistema optimizado luego de la sintonización .....	65
<b>Figura 63.</b> Funcionamiento del PID .....	66
<b>Figura 64.</b> Conjuntos de entrada .....	68
<b>Figura 65.</b> Funciones de membresía .....	68
<b>Figura 66.</b> Reglas del control difuso .....	69
<b>Figura 67.</b> Configuración de parámetros del bloque de programación .....	70
<b>Figura 68.</b> Pruebas de comunicación Modbus TCP .....	72
<b>Figura 69.</b> Señal de control enviada a la planta .....	73
<b>Figura 70.</b> Respuesta del controlador de Lógica Difusa .....	73

<b>Figura 71.</b> Controlador PID propio del PLC .....	74
<b>Figura 72.</b> Prueba en el controlador de Lógica Difusa.....	75
<b>Figura 73.</b> Comportamiento de la planta con PID.....	75
<b>Figura 74.</b> Comportamiento de la planta con Lógica Difusa.....	76
<b>Figura 75.</b> Controlador PID vs Controlador de Lógica Difusa .....	76
<b>Figura 76.</b> Dificultad del uso del módulo de E/S .....	79
<b>Figura 77.</b> Experiencia de uso del módulo de E/S con las estaciones industriales .....	80
<b>Figura 78.</b> Calificación del módulo de E/S con las estaciones industriales .....	81
<b>Figura 79.</b> Implementar diagramas escalera y sistemas de control en las estaciones.....	82
<b>Figura 80.</b> Refuerzo de conocimientos en diagrama de escalera y sistemas de control.....	83
<b>Figura 81.</b> <i>Tabla de la distribución del Chi-cuadrado</i> .....	88



## **RESUMEN**

En el presente trabajo de titulación se diseña y se construye un módulo de E/S con la finalidad de comunicarse con dos ambientes industriales virtualizados y el PLC. Este módulo de E/S recopila los datos de sensores virtuales y transforma los datos en señales eléctricas que se envía al controlador para procesar y dar una salida física, el módulo de E/S transformará estas salidas físicas y las enviará al ambiente virtual como señales de control. Las señales eléctricas seguirán las normas de señales de instrumentación, esto quiere decir que sus niveles de voltaje analógico serán 0-10V, y señales digitales de 24V. Los ambientes virtuales se observarán desde un monitor de computadora y serán controlados por el PLC S7 300 del laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L. La primera estación industrial es una planta digital y servirá para implementar el diagrama escalera y realizar cualquier secuencia que se programe, mientras que la segunda planta industrial es una analógica y para simular su comportamiento, se estimará el modelo matemático para poder ser controlado con dos sistemas de control diferentes como el PID y el difuso. El ambiente virtual se comportará similar a una planta real mostrando el funcionamiento de la misma dependiendo de las señales de control recibidas.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SEÑALES ELÉCTRICAS**
- **AMBIENTES VIRTUALES**
- **LÓGICA DIFUSA**
- **SISTEMAS DE CONTROL**

## **ABSTRACT**

In the present degree work designs and builds an I/O module in order to communicate with two virtualized industrial environments and the PLC. This I/O module collects data from virtual sensors and transforms the data into electrical signals that are sent to the controller to process and give a physical output, the I/O module will transform these physical outputs and send them to the virtual environment as control signals. The electrical signals will follow the standards for instrumentation signals, meaning that their analog voltage levels will be 0-10V, and 24V digital signals. The virtual environments will be observed from a computer monitor and will be controlled by the PLC S7 300 of the Mechatronics laboratory of the University of the Armed Forces ESPE-L. The first industrial station is a digital plant and will serve to implement the ladder diagram and perform any sequence that is programmed, while the second industrial plant is an analog and to simulate its behavior, the mathematical model will be estimated to be controlled with two different control systems such as PID and diffuse. The virtual environment will behave similar to a real plant showing its operation depending on the control signals received.

### **KEYWORDS:**

- **ELECTRICAL SIGNALS**
- **VIRTUAL ENVIRONMENTS**
- **FUZZY LOGIC**
- **CONTROL SYSTEMS**

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes

Se podría definir al entorno virtual como un sistema informático que genera en tiempo real representaciones de la realidad, consideradas como ilusiones ya que se muestra una realidad perceptiva sin ningún soporte físico. (Cabra Reyes, 2014)

En la actualidad la realidad virtual crea escena en un mundo no tangible que solo existe en el ordenador, también permite capturar la voluntad del usuario en sus movimientos naturales proyectándolos en el mundo virtual. (Andaluz, Castillo, Miranda, & Aulema, Virtual Reality Applied to Industrial Processes, 2017)

La realidad virtual no inmersiva tiene por objeto ser proyectada a través de un monitor o pantalla (Kozhevnikov & Gurlitt, 2013), la escena virtual 3D es parte de un ambiente físico; es decir, la persona interactúa mayormente en el ambiente físico y relativamente poco en el ambiente virtual. (Khademi, Hondori, Dodakian, Crammer, & Lopes, 2013)

La realidad virtual es muy extensa una de sus aplicaciones es la creación de entornos que permiten la supervisión, monitoreo y control de procesos industriales, así como el contraste entre la opción de emulación y la interacción real. Tiene la posibilidad de simular o trabajar con información en tiempo real, vinculada a módulos de procesos existentes de las variables físicas más importantes. (Andaluz, Castillo, Miranda, & Alulema, Realidad virtual aplicada a procesos industriales., 2017)

La creciente influencia de las aplicaciones de aprendizaje y laboratorios virtuales, requiere que el futuro ingeniero tenga disponible una herramienta adecuada para mejorar sus capacidades frente a los diferentes ambientes industriales. (Montanari, Luciano, Stopa, & Lima, 2017)

En proyectos de investigación desarrollados en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga se distingue que el enfoque de entornos virtuales industriales se orienta a supervisar plantas industriales, verificar variables de sensores de la planta, etc., lo que se traduce que el enfoque del entorno virtual es para el aprendizaje de operadores industriales. En el laboratorio de Mecatrónica existen diferentes estaciones para realizar prácticas, sin embargo, el rediseño curricular obliga a buscar alternativas para mantenerse a la vanguardia con la tecnología de las nuevas estaciones.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Los altos costos de implementación de laboratorios para el aprendizaje en el área de la automatización y control, sumado a la economía que atraviesa el país y el aumento de estudiantes de la carrera de ingeniería mecatrónica, obligan a buscar alternativas de solución para sustentar la inminente necesidad de ampliación de los laboratorios.

En la actualidad los recursos tecnológicos no son aprovechados para cubrir las necesidades en el aprendizaje. Las tendencias de la educación deben estar fuertemente ligadas con el desarrollo tecnológico, es por eso que se utiliza herramientas de software como: software de simulación, presentación digital, e-learning, e-books, entornos virtuales, etc.

La mayor parte de empresas pierden el dinero y tiempo en el proceso de capacitación, los entornos de realidad virtual tienen un alto potencial en cuanto a enseñanza se refiere. Muchas empresas han comenzado a realizar procesos de aprendizaje con entornos de realidad virtual, como procesos de soldadura, operación en ambientes industriales, celdas de manufactura, etc.

El laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga cuenta con un limitado número de estaciones de trabajo para prácticas en el área de automatización y control e instrumentación, limitando así el número de prácticas que los estudiantes realizan.

Por lo mencionado en párrafos anteriores, se puede concluir que para solucionar la problemática planteada se desarrollará un entorno virtual 3D basado en modelos CAD de estaciones industriales reales con el fin de que el entorno sirva para la simulación de la planta, para monitorizar el funcionamiento de automatización del entorno a través de entradas y salidas de un PLC (Programmable Logic Controller) o microcontrolador previamente programado.

### **1.3. Justificación e importancia**

El desarrollo de entornos virtuales, permite una gran cantidad de aplicaciones con un costo de desarrollo muy reducido, siendo está una de las alternativas más económicas para suplir la necesidad de laboratorios para la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Es por ello que se plantea la virtualización de plantas industriales o estaciones didácticas, los cuales interactúan con señales de control reales desde un controlador, logrando así verificar el correcto funcionamiento de la lógica de control previamente programada en el controlador.

El proyecto es una alternativa de solución al reducido número de estaciones de trabajo en el laboratorio de Mecatrónica aportando como una herramienta para los diferentes niveles, ya que el costo de implementación de estaciones didácticas es muy alto y el número de estudiantes aumenta. Con esta propuesta el laboratorio de Mecatrónica ampliaría su número de estaciones, permitiendo a los estudiantes realizar un número mayor de prácticas del laboratorio. Además de permitir al estudiante realizar prácticas en estos ambientes virtuales fuera del horario de atención del laboratorio.

Por los antecedentes mencionados se plantea la virtualización de ambientes industriales capaces de interactuar con controladores programados por los estudiantes, aportando así una mayor experiencia en el área de la automatización y control en los estudiantes de ingeniería mecatrónica, para ello se realizará una selección de las estaciones más óptimas. Este proyecto servirá de base para la creación de nuevas estaciones didácticas virtuales, permitiendo en un futuro obtener laboratorios completos virtuales, ya que no existen limitaciones al crearlos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un módulo de E/S con un ambiente virtual que permita la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas, para el Laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Crear modelos 3D de plantas industriales reales mediante software CAD, para ser el escenario del ambiente virtual.
- Virtualizar ambientes industriales a través de modelos CAD a fin de implementar un simulador 3D en realidad virtual no inmersiva que permita ser controlado a través de un controlador físico.
- Obtener el modelo matemático que rige a la planta industrial, a través de ecuaciones y cálculos.
- Diseñar el módulo de E/S para la comunicación de las señales de salida y entrada entre el controlador y el entorno virtual.
- Implementar el módulo de E/S enlazado al controlador para verificar el correcto funcionamiento de entradas y salidas.
- Diseñar 2 diferentes tipos de control para el ambiente virtual mediante el uso de una herramienta de software matemático.

### **1.5. Hipótesis**

¿El diseño e implementación de un módulo de E/S con un ambiente virtual permite la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas?

### **1.6. Variables**

- **Variables Independientes**

Módulo de E/S con un ambiente virtual en estaciones virtuales simuladas.

- **Variables Dependientes**

Implementación de diagrama escalera.

Implementación de sistemas de control.

### **1.7. Realidad Virtual**

La realidad virtual o RV se define como una clase de tecnologías de comunicación multisensoriales controladas por un ordenador que permiten interacciones más intuitivas con los datos e involucran a los sentidos humanos de nuevas maneras. Esta tecnología fue concebida para facilitar el manejo de la información, ofrece una forma diferente de ver y experimentar la información. (McLellan, 1993)

La realidad virtual es diferente del resto ya que permite sumergirse totalmente en un mundo virtual. Puede simular una experiencia sensorial completa al interior de un ambiente artificial sin ver nada de lo que hay en el exterior. Para "meterte dentro" de este mundo virtual sueles necesitar tanto unas gafas especiales como unos auriculares. (Andaluz, Sánchez, Chamba, & Romero, 2016)

Según Wolfgang Broll & Bernhard Jung (2013) se llama a un sistema de RV un sistema informático, que consiste en un hardware y un software adecuados, con el fin de realizar la presentación de una realidad virtual.

Un mundo virtual es el contenido que se muestra con el sistema de la RV. El mundo virtual contiene modelos de objetos, su descripción de comportamiento para el modelo de simulación y su disposición en el espacio como indica la **Figura 1**.



Si se representa un mundo virtual con un sistema de RV, se habla de un entorno virtual para uno o más usuarios.



*Figura 1.* Realidad Virtual

Fuente: (Croft, 2018)

### 1.7.1. Características de la Realidad Virtual

Está regido por 2 conceptos según Mónica Inés Fernández (2014):

- **Inmersión:** Consiste a la superposición de los estímulos reales y sintéticos (imágenes, sonidos, táctiles, etc.) recibidos por el usuario durante el experimento. El sistema RV se clasifica:
  - **Inmersivo:** El usuario recibe estímulos sensoriales del sistema RV mientras está aislado del mundo como se observa en la **Figura 2**.



*Figura 2.* Inmersivo

Fuente: (Rivera, 2018)

- **Semi-inmersivo:** Brinda un grado de abstracción del mundo real menor que los sistemas inmersivos completos combinando estímulos reales y sintéticos como se aprecia en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Semi-inmersivo  
Fuente: (Rivera, 2018)

- **No inmersivo:** El usuario permanece en el mundo real y el compromiso con el entorno virtual se logra a través de la interacción con las representaciones visuales y de audio de alta calidad que promueven al usuario a involucrarse emocionalmente como se aprecia en la **Figura 4**.



**Figura 4.** No inmersivo  
Fuente: (Rivera, 2018)

- **Presencia:** Es la sensación psicológica de ser parte de un entorno particular, incluso virtual. Esto se produce cuando el cerebro interpreta la información recibida por los sentidos como válida y coherente, de modo que el usuario realmente se siente parte de un medio ambiente.

En el estado del arte de la realidad virtual, se han desarrollado una serie de investigaciones creando prototipos e implementando, con el afán de que en un futuro sus aportes sean de ayuda y puedan tener una gran acogida en la vida cotidiana.

La realidad virtual tiene una gran acogida en la sociedad ya que cada año ofertan diversos productos a los usuarios con nuevas características innovadoras.

Los productos desarrollados más importantes de la realidad virtual inmersiva son:

- **HTC VIVE Pro Eye:** Posee un módulo de seguimiento ocular, este módulo permite que los ojos se transformen en un controlador intuitivo y un comunicador de intenciones. Los movimientos de los ojos y los parpadeos se rastrean, luego se imitan instantáneamente con tu avatar, creando entornos sociales virtuales con interacciones realistas y expresivas, todo esto a través de los sensores LED ubicados alrededor de las lentes como indica en la **Figura 5**. El precio de venta al público en Estados Unidos está alrededor de 1599 dólares americanos. (VIVE Enterprise, 2019)



**Figura 5.** Sistema VIVE Pro Eye VR  
Fuente: (VIVE Enterprise, 2019)

- **OCULUS Rift S:** Es un visor de juegos para PC como muestra la **Figura 6**, puede reproducir tus movimientos en la realidad virtual sin necesidad hacia donde veas, permite ver el entorno sin necesidad de retirar el visor. (OCULUS, 2019)



**Figura 6.** Visor de juegos OCULUS Rift S  
Fuente: (OCULUS, 2019)

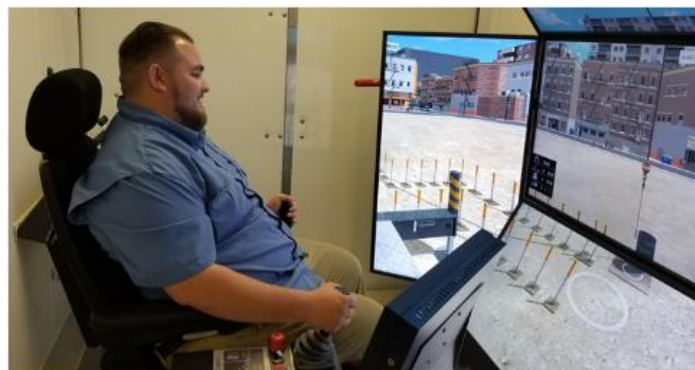
Mediante sus controladores Oculus Touch como se aprecia en la **Figura 7**, trasladan los movimientos de las manos a la realidad virtual de una manera precisa, realista e intuitiva. (OCULUS, 2019)



*Figura 7.* Controladores Oculus Touch  
Fuente: (OCULUS, 2019)

Los productos desarrollados más importantes de la realidad virtual semi-inmersiva son:

- **Simulador de entrenamiento Vortex:** La empresa CM LABS desarrolló un simulador de entrenamiento para maquinaria pesada de manera segura y eficiente. Cuenta con varios paquetes de entrenamiento como es el caso del entrenamiento de grúas y equipos de elevación como se observa en la **Figura 8**. Su finalidad es capacitar operadores más seguros, reducir el desgaste del equipo con los principiantes (CM LABS, 2019).



*Figura 8.* Simulador de entrenamiento VORTEX  
Fuente: (CM LABS, 2019)

- **Simulador de vuelo Redbird FMX:** Está diseñado para generar una imagen envolvente con un entorno de formación tan realista. Posee una plataforma móvil que simula el

proceso de vuelo, se puede configurar varias condiciones de vuelo como el clima, viento y fallas en los equipos como indica la **Figura 9**. Con esto pretenden ahorrar tiempo y dinero de los estudiantes y prepararlos para volar un avión real. (REDBIRD, 2019)



**Figura 9.** Redbird FMX  
Fuente: (REDBIRD, 2019)

### 1.7.2. Arquitectura de la RV

#### Componentes de un sistema de realidad virtual

En un sistema RV existen componentes de hardware y de software.

##### a. Componentes Hardware

- **Periféricos de entrada:** Son sensores y su función es captar las acciones del usuario y enviar esta información al ordenador como se observa en la **Figura 10**. Estos periféricos son frecuentes en la realidad virtual son los posicionadores su función es informar en tiempo real al sistema la posición y la orientación de la cabeza, de la mano, o de todo el cuerpo del usuario, los guantes que detectan movimiento de los dedos de la mano y los micrófonos permiten grabar la voz del participante.



**Figura 10.** Periféricos de entrada  
Fuente: (Wolfgang Broll & Bernhard Jung, 2013)

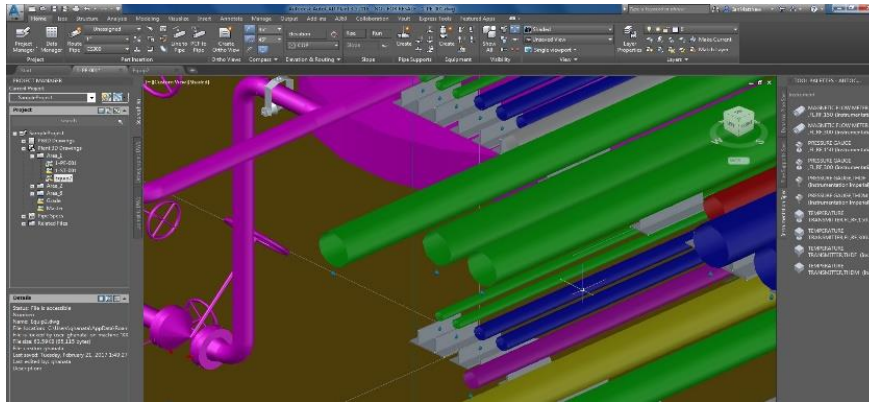
- **Periféricos de salida:** Interpretan las señales de audio, video, generados por el ordenador en estímulos para los órganos de los sentidos y se clasifican de acuerdo al sentido que va dirigido: visuales (cascos estereoscópicos, pantallas de protección), de audio (altavoces, sistemas de sonido), de tacto y fuerza (dispositivos táctiles), y del sentido del equilibrio (plataformas móviles) como indica en la **Figura 11**.



**Figura 11.** Periféricos de salida  
Fuente: (Cardozo, 2004)

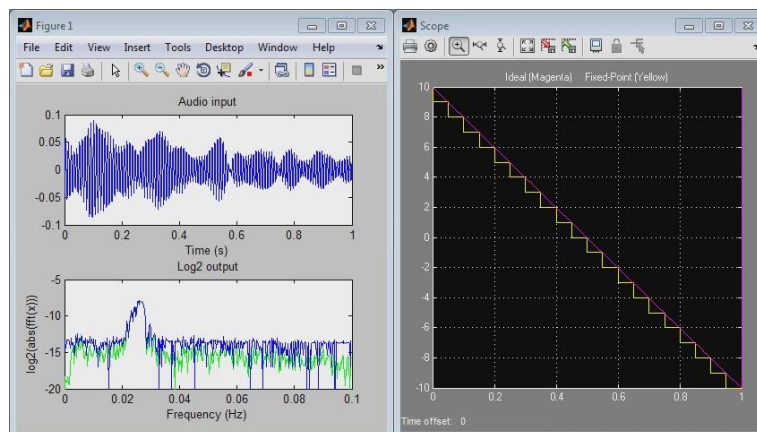
## b. Componentes Software

- **Modelo geométrico 3D:** Es una representación geométrica en 3D que permite realizar cálculos de imágenes, colisiones y generación de sonido espacial como muestra la **Figura 12**. El explorar la escena y observar desde cualquier punto de vista es una característica de un sistema virtual.



**Figura 12.** Software AUTOCAD PLANT 3D  
Fuente: (AUTODESK, 2019)

- **Software de tratamiento de datos de entrada:** Es el encargado de recibir y procesar la información que proporcionan los sensores como se aprecia en la **Figura 13**.



**Figura 13.** Software Matlab  
Fuente: (Matlab, 2019)



- **Software de simulación física:** Realiza las modificaciones en la representación digital del entorno, de acuerdo, a las acciones que tome el usuario como indica la **Figura 14**. También se puede encargar del cálculo de colisiones, deformaciones afectando el escenario digital.



**Figura 14.** Software UNITY 3D  
Fuente: (Unity 3D, 2019)

### 1.7.3. Sistemas de la RV

Estos sistemas permiten a los usuarios a participar en espacios artificiales creados por el ordenador. Es importante señalar que no todos los mundos virtuales son tridimensionales. Esto no es necesario para proporcionar una experiencia enriquecedora. Y para explorar un mundo virtual, el usuario no tiene que estar completamente inmerso en él: la interacción en primera persona (directa), así como la interacción en segunda y tercera persona, con el mundo virtual son todas posibles. (McLellan, 1993)

La clasificación de los sistemas de realidad virtual según (Mónica Inés Fernández, 2014) es:

- **Sistemas de escritorio:** Las aplicaciones son mostradas por una imagen 2D o 3D a través de una pantalla de ordenador. Representa mundos de 3 dimensiones, los usuarios tienen libertad de desplazarse al interior de estos mundos. Un ejemplo son la mayoría de juegos de ordenador con alto nivel de realismo como se observa en la **Figura 15**.



*Figura 15.* Sistema de Escritorio  
Fuente: (Mónica Inés Fernández, 2014)

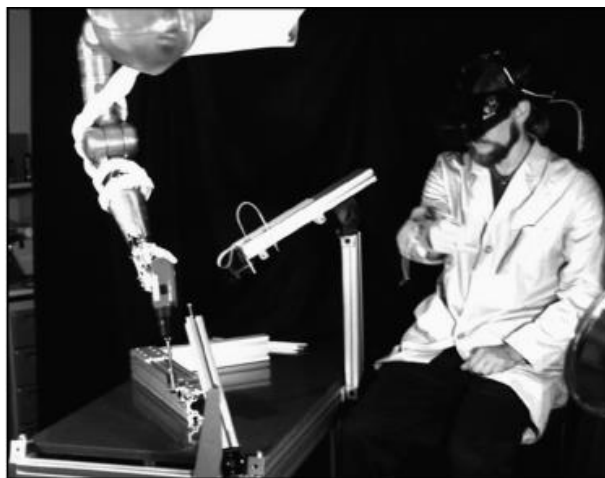
- **Realidad virtual en segunda persona:** Comprenden percepciones y respuestas en tiempo real a las acciones de los usuarios involucrados, sin utilizar cascos, guantes, alambres o cualquier otro tipo de interfaz. Los sistemas de inmersión simulan las percepciones del mundo real. Los sistemas en segunda persona, el usuario sabe que está al interior del mundo virtual porque se ve a sí mismo como parte de la escena como muestra la **Figura 16**.



**Figura 16.** Realidad Virtual en segunda persona

Fuente: (Mónica Inés Fernández, 2014)

- **Sistemas de telepresencia:** La telepresencia enlaza sensores remotos en el mundo real con los sentidos de un operador humano, estos sistemas utilizan cámaras, micrófonos, dispositivos táctiles y de fuerza con elementos de retroalimentación, ligados a elementos de control remoto con la finalidad de que el operador manipule los dispositivos ubicados en localidades remotas experimentando la sensación de estar en el sitio real como se aprecia en la **Figura 17**.



**Figura 17.** Sistemas de telepresencia

Fuente: (Mónica Inés Fernández, 2014)

- **Sistemas de inmersión de RV:** Sumergen al usuario dentro del mundo virtual mediante dispositivos HMD (Head Mounted Display), equipos de gestos y movimientos y procesadores de sonido como se observa en la **Figura 18**.



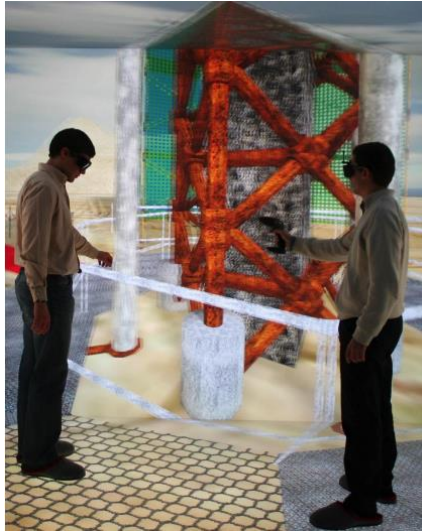
**Figura 18.** Sistemas de inmersión RV

Fuente: (Mónica Inés Fernández, 2014)

#### **1.7.4. Entorno Virtual**

El entorno virtual o VE son espacios artificiales de alguna manera separados del mundo físico. Se basan en estímulos generados por ordenador. Estos estímulos son frecuentes de naturaleza visual y sonora, ocasionalmente pueden ser hápticos. El VE proporciona a los usuarios el sentido de presencia, es decir, la conciencia del tiempo, el espacio y la situación, todos estos estímulos artificiales generados por computadora creando la sensación de inmersión en el VE como muestra la **Figura 19**.

Lo que le distingue al VE del cine o video 3D es la interacción. El usuario de VE es siempre capaz de interactuar de alguna manera con el entorno. Es normal asociar la noción de VE con el contenido presentado en forma de gráficos 3D en tiempo real.



**Figura 19.** Entorno Virtual  
Fuente: (BBVA INNOVATION CENTER, 2015)

### **1.8. Controlador Lógico Programable**

El Controlador Lógico Programable o PLC según Bolton (2006) es un controlador basado en microprocesador que utiliza memoria programable para almacenar instrucciones y para efectuar funciones tales como lógica, secuenciación, temporización, conteo y aritmética con el fin de controlar máquinas y procesos.

Los PLC tienen la gran ventaja de que el mismo controlador básico se puede utilizar con una amplia gama de sistemas de control. Para modificar un sistema de control y las reglas que se van a utilizar, basta con que el operador teclee un conjunto de instrucciones diferente. No hay necesidad de cambiar el cableado. El resultado es un sistema flexible, rentable, que puede utilizarse con sistemas de control que varían bastante en su naturaleza y complejidad.

Los PLC son similares a los ordenadores como indica la **Figura 20**, pero mientras que los ordenadores están optimizados para tareas de cálculo y visualización, los PLC están

optimizados para tareas de control y el entorno industrial. Poseen varias ventajas (Bolton, 2006):

- Robusto y diseñado para soportar vibraciones, temperatura, humedad y ruido.
- Disponen de interfaz para entradas y salidas que ya se encuentran en el interior del controlador.
- Son fáciles de programar y tienen un lenguaje de programación de fácil comprensión que se ocupa principalmente de las operaciones lógicas y de conmutación.



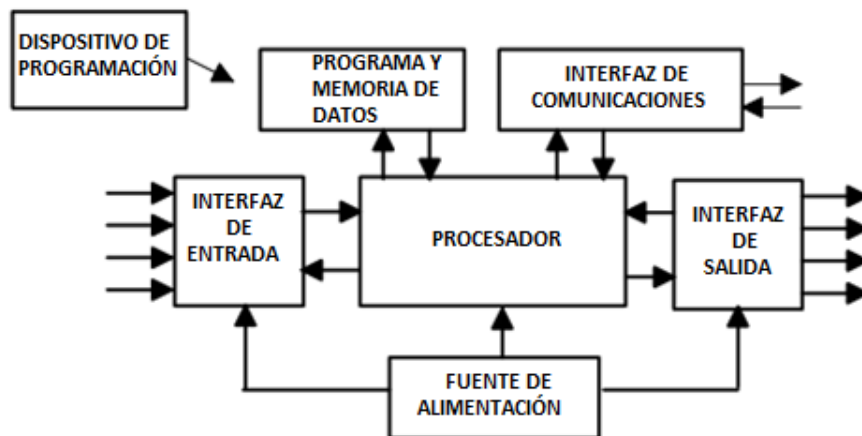
**Figura 20.** Ejemplos PLC

Fuente: (SIEMENS, 2019)

Su hardware como se aprecia en la **Figura 21** se divide en:

- **Unidad central de proceso (CPU):** Es la unidad que contiene el microprocesador y que interpreta las señales de entrada y realiza las acciones de control, según el programa almacenado en su memoria, comunicando las decisiones como señales de acción a las salidas.
- **Fuente de alimentación:** Es necesaria para convertir la tensión de red de corriente alterna en la tensión de corriente continua baja (5V) necesaria para el procesador y los circuitos de los módulos de interfaz de entrada y salida.

- **Dispositivo de programación:** Se utiliza para introducir el programa deseado en la memoria del procesador. El programa se desarrolla en el dispositivo y luego se transfiere a la unidad de memoria del PLC.
- **Unidad de memoria:** Aquí se almacena el programa que debe utilizarse para las acciones de control que debe ejercer el microprocesador y los datos almacenados desde la entrada para su procesamiento y para su salida.
- **Secciones de entrada y salida:** Es donde el procesador recibe información de dispositivos externos y comunica información a dispositivos externos.
- **Interfaz de comunicaciones:** Se utiliza para recibir y transmitir datos en redes de comunicación desde o hacia otros PLC remotos. Su función es la verificación de dispositivos, la adquisición de datos, la sincronización entre aplicaciones de usuario y la gestión de conexiones.



*Figura 21.* Hardware de un PLC

Fuente: (Bolton, 2006)

### 1.8.1 Unidad de entrada/salida

Las señales de entrada de los sensores y las salidas necesarias para los dispositivos de accionamiento pueden de acuerdo a (Bolton, 2006):

- **Analógica:** es decir una señal cuyo tamaño está relacionado con el tamaño de la cantidad que se está detectando.
- **Discreto:** es decir esencialmente solo una señal de encendido y apagado.

La CPU, sin embargo, debe tener una entrada de señales digitales de un tamaño particular, normalmente de 0 a 5 V. Las unidades de entrada/salida (E/S) de los PLC están diseñadas para que un rango de señales de entrada pueda convertirse en señales digitales de 5 V y para que un rango de salidas esté disponible para controlar dispositivos externos.

### **1.8.2 Programación PLC**

Los dispositivos de programación pueden ser un dispositivo portátil, una consola de escritorio o un ordenador. Una vez que el programa es diseñado en el dispositivo de programación y está listo se transfiere a la unidad de memoria del PLC (Jack, 2007).

- Los dispositivos de programación de mano normalmente contienen suficiente memoria para permitir que la unidad retenga los programas mientras se llevan de un lugar a otro.
- Es probable que las consolas de escritorio tengan una unidad de visualización con un teclado y una pantalla completos.
- Las computadoras personales están ampliamente configuradas como estaciones de trabajo de desarrollo de programas. Una gran ventaja de usar una computadora es que el programa se puede almacenar en el disco duro y las copias se pueden hacer fácilmente.



### 1.9. Hardware in The Loop

La simulación de Hardware-in-the-Loop según Waeltermann (2016) es un método utilizado en el ciclo de desarrollo de productos en el que uno o más componentes reales interactúan con componentes simulados en tiempo real (modelos dinámicos).

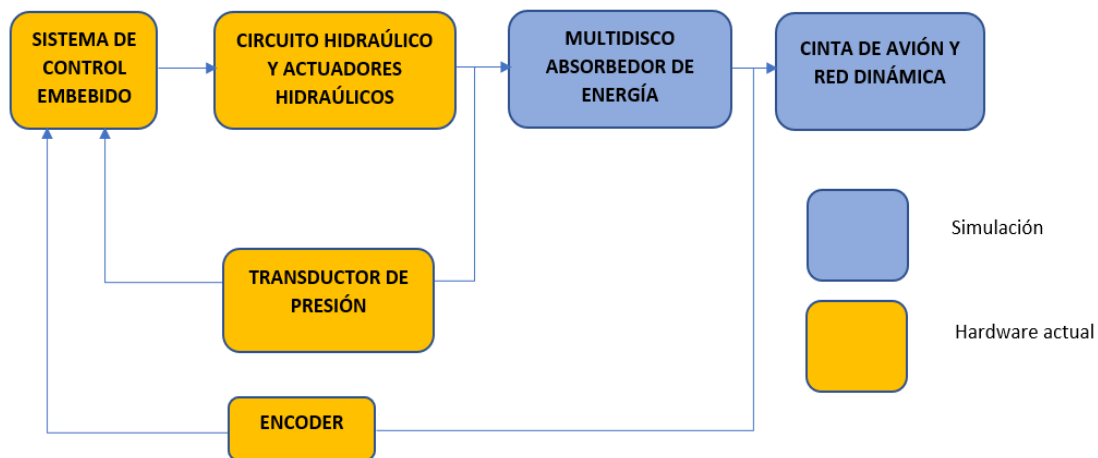
El hardware de control en el bucle implica la prueba de un dispositivo en sus puertos de información. Las señales digitales o analógicas digitalizadas se intercambian entre el dispositivo de bajo prueba y un simulador en tiempo real. Esto permite probar las funciones del controlador de un dispositivo para aplicaciones tales como (De Jong, de Graaff, & Vaessen, 2011):

- La evaluación de los controladores de la industria aeroespacial.
- Pruebas en la industria automotriz de unidades de control electrónico.
- Desarrollar nuevos componentes y actuadores.
- Generadores eléctricos de sistemas de conversión de energía eólica.
- Sistemas de propulsión para vehículos eléctricos y vehículos eléctricos híbridos.

La idea del modelado físico HIL es que un prototipo de controlador real, o un prototipo de dispositivo completo, puede colocarse dentro de un entorno simulado que sea representativo (pero no perfecto) como se observa en la **Figura 22**.

Las pruebas pueden ejecutarse en tiempo real, lo que casi con toda seguridad no sería el caso si el modelado detallado del dispositivo estuviera integrado en la plataforma de simulación.

El comportamiento del dispositivo real dentro del entorno propuesto puede explorarse con relativa seguridad y con un riesgo mínimo de daño al hardware real. El entorno y los escenarios de prueba propuestos pueden ampliarse desde condiciones normales para incluir eventos extremos, que pueden ser difíciles o peligrosos de recrear en la realidad, pero que representan eventos durante los cuales el dispositivo debe mantener un comportamiento definido, como un funcionamiento estable. (Roscoe, Guillo-Sansano, & Burt, 2016)



*Figura 22.* Ejemplo de un HIL de un sistema de frenado hidráulico para aviones

### 1.9.1 Componentes de software del sistema HIL

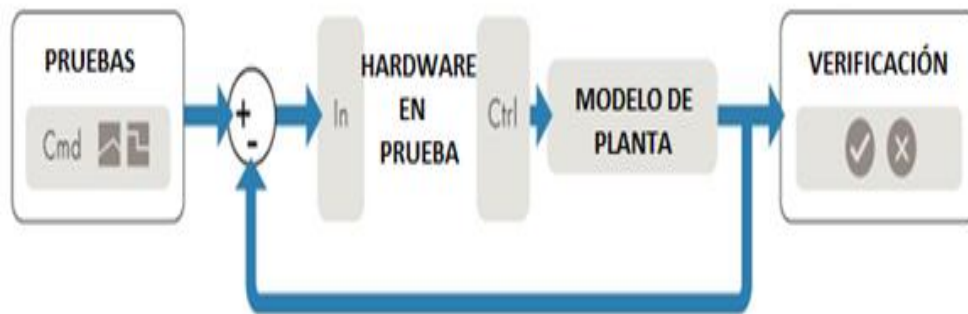
Se subdividen en el sistema operativo (PC), el software en tiempo real y el modelo matemático de la planta. (Waeltermann, 2016)

#### a. Software operativo

La programación gráfica de las funciones de control mediante entornos de simulación como muestra la **Figura 23.** en MATLAB/Simulink. El mayor beneficio se deriva de los sistemas HIL si las pruebas no son inactivas sino automatizadas. Las pruebas HIL se realizan

frecuentemente durante la noche o fines de semana, y todo lo que los operadores necesitan hacer durante el día es examinar los informes de pruebas generados, repetir las pruebas fallidas e implementar nuevas pruebas.

Los lenguajes de script como VBA, MATLAB y Python se utilizan con frecuencia para la automatización. Sin embargo, también existen herramientas de prueba en el mercado que permiten que la implementación de la prueba se realice de forma gráfica.



**Figura 23.** Esquema de las funciones de control en Simulink

#### b. Software en tiempo real

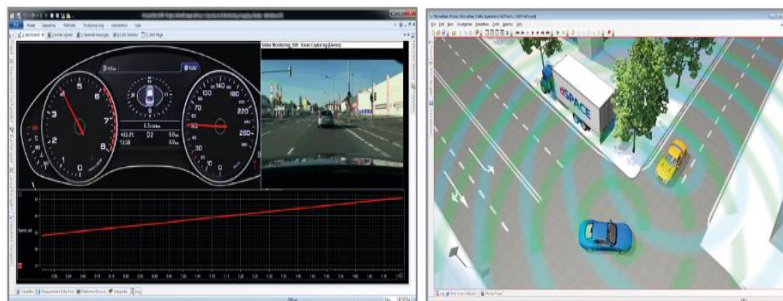
Para cumplir con los estrictos requisitos de la simulación HIL en tiempo real, se utilizan sistemas operativos en tiempo real diseñados para obtener el máximo rendimiento de E/S y la mínima latencia de E/S.

Estos requisitos se cumplen a menudo sólo con núcleos especiales en tiempo real, no obstante, ahora también es posible configurar sistemas HIL sencillos basados en sistemas operativos estándar en tiempo real como QNX y LINUX-RT.

### a. Modelos dinámicos

Para cerrar el circuito de control entra la unidad de control y las entradas/salidas del simulador se necesitan modelos dinámicos de planta. Estos deben proporcionar una representación suficientemente buena del sistema para ser controlado. Los modelos muy detallados se utilizan usualmente en el desarrollo de motores y chasis, y estos modelos están lejos de ser capaces de funcionar en tiempo real como se indica la **Figura 24**.

Para la operación de HIL se utilizan modelos específicos y enfoques de modelos que son capaces de funcionar en tiempo real y suficientemente precisos con respecto a los sensores de la unidad de control.



**Figura 24.** Ejemplo de modelo dinámico  
*Fuente:* (Waeltermann, 2016)

## CAPÍTULO II

### DISEÑO SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se escogerá las estaciones industriales a simular adecuadas para el laboratorio de Mecatrónica de acuerdo a las necesidades del mismo, además se seleccionará y se diseñará la parte electrónica del módulo de E/S definiendo su funcionamiento con el ambiente virtual y sus estaciones industriales simuladas.

El ambiente virtual se comunicará a través del módulo de E/S con el controlador físico. El módulo recopila los datos de sensores virtuales y transforma los datos en señales eléctricas que se envía al PLC para procesar y dar una salida física acorde al programa Ladder programado por el estudiante. El módulo de E/S transformará estas salidas físicas y las enviará al ambiente virtual como señales de control, en las cuales el ambiente virtual simulará el comportamiento de la planta, creando una comunicación bidireccional del proceso.

#### **2.1. Análisis del problema**

La falta de estaciones industriales en el Laboratorio de Mecatrónica para el uso y aprendizaje de los estudiantes y los altos costos para la adquisición de las mismas, genera inconvenientes por el número de estudiantes con respecto al número de estaciones disponibles. La construcción e implementación del módulo de E/S en el Laboratorio de Mecatrónica, tiene como objetivo tener estaciones industriales con todas sus características y funcionamiento a través de un entorno virtual sin necesidad de comprar estas estaciones. Estas estaciones usualmente son utilizadas en mecatrónica y automatización con fines

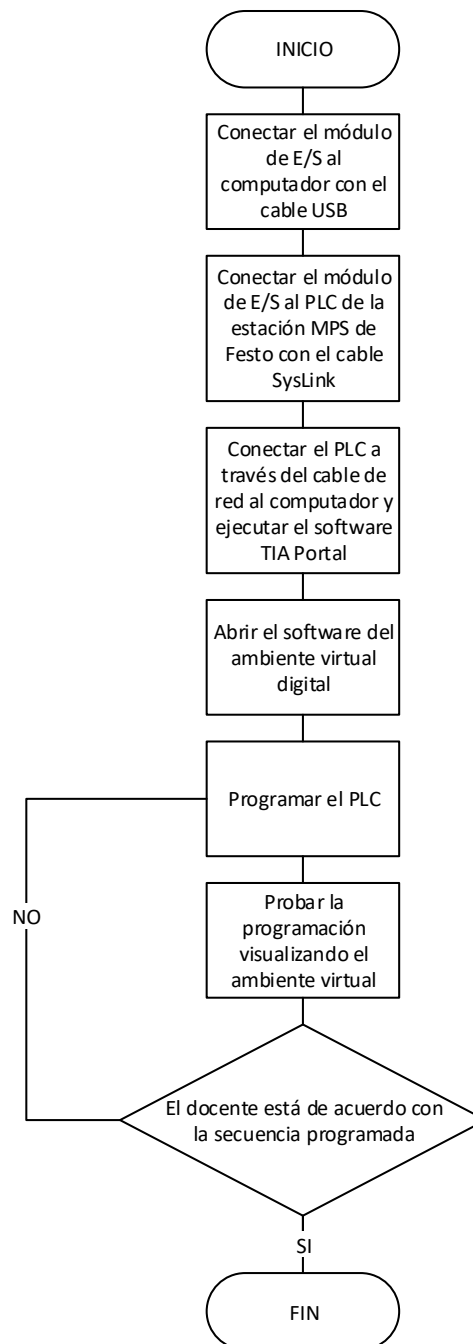
didácticos, pues son efectivas en el aprendizaje de procesos industriales mediante el uso y manipulación de controles mecánicos y neumáticos.

## **2.2. Selección de estaciones a virtualizar**

Para seleccionar las estaciones industriales adecuadas a simular es necesario tomar en cuenta que el módulo de E/S constará de 8 entradas y 8 salidas digitales, por lo que es una limitante al escoger una estación industrial ya existente, sin embargo, las estaciones industriales a simular serán creadas con un grado de complejidad que se rija al módulo de E/S.

Es por ello que, para el primer ambiente virtual, se seleccionó una estación de distribución, esta distribuye objetos cuadrados, los manipula hasta llegar a una banda y mediante esa banda transporta a su destino.

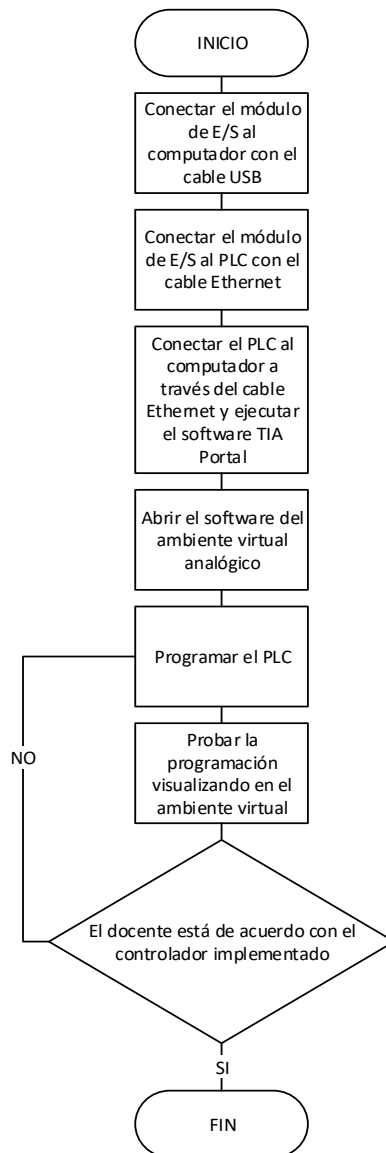
El PLC tiene conexión con el panel de operación de la MPS Festo físicamente, las señales de salida de los actuadores y señales de los sensores virtuales serán comunicados entre el módulo de E/S y el PLC a través del cable SysLink. El flujo de procesos que se debe llevar a cabo para la utilización de esta estación se muestra en la siguiente **Figura 25**.



**Figura 25.** Flujo de procesos de la estación de distribución

Para el segundo ambiente virtual se seleccionó una planta de nivel, tiene un tanque abierto de 100m<sup>3</sup>, que se visualiza en el entorno virtual de Unity. Es importante recalcar que esta planta está regida a través de un modelo matemático y se comunica con el entorno virtual,

permitiendo una visualización de la variable manipulada (Para el caso planteado será el nivel del tanque 0 - 8m). Tanto la variable medida o retroalimentación de la planta con la señal de control serán obtenidos mediante Modbus TCP (Transmission Control Protocol). El flujo de procesos que se debe llevar a cabo para la utilización de esta estación se muestra en la siguiente **Figura 26**.



**Figura 26.** Flujo de procesos de la planta de nivel

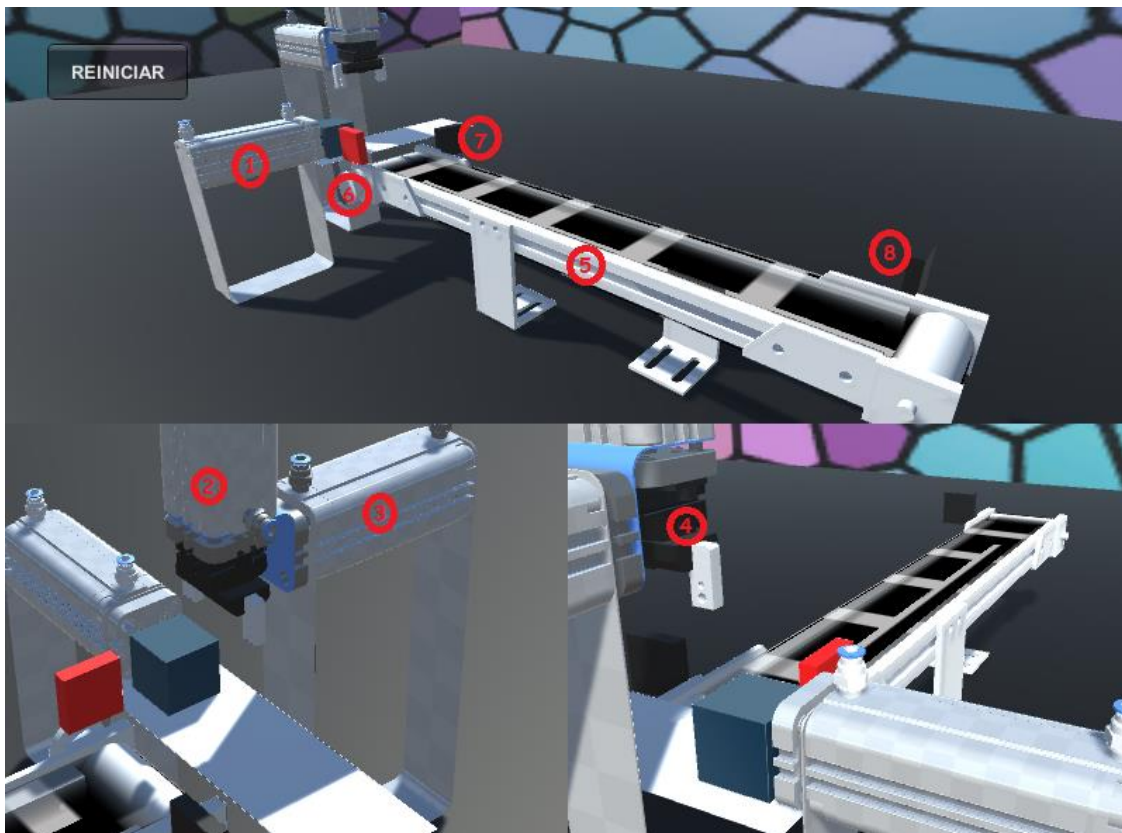


### 2.3. Diseño CAD de las estaciones

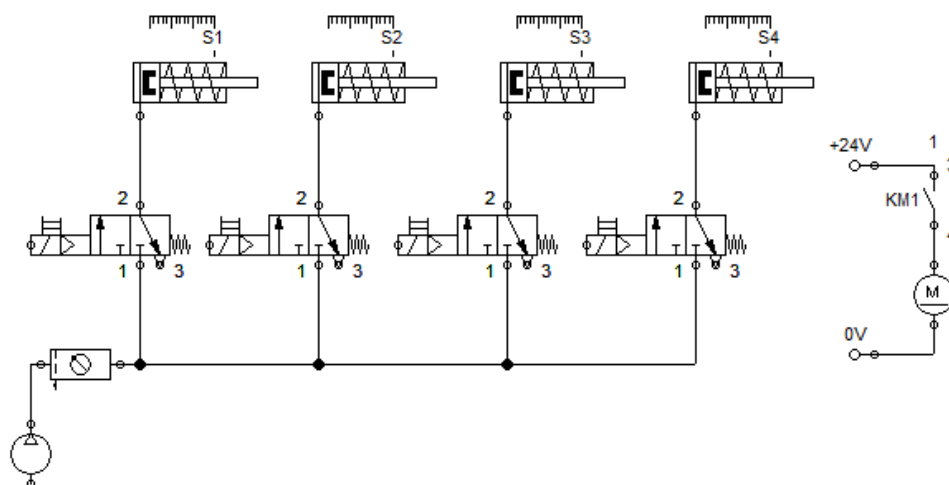
Las estaciones que se diseñaron para el entorno virtual, tienen actuadores y sensores comerciales. El software Festo Part Manager provee una lista de la mayoría de sus productos a disposición para uso de sus modelos CAD. Estos productos de Festo fueron utilizados para crear la estación electro-neumática y añadiendo partes de otros fabricantes. Las estaciones no son una copia de alguna estación comercial, sino más bien se ha diseñado de tal manera que se utilicen partes comerciales en la estación creada.

El primer ambiente virtual es una estación electro-neumática como indica la **Figura 27** con una cinta transportadora. El esquema electroneumático de este ambiente se puede observar en la **Figura 28**. A continuación, se detalla los actuadores y sensores de la estación:

1. Cilindro neumático con la función de alimentador de piezas
2. Cilindro neumático de bajada y subida del brazo para transporte de la pieza
3. Cilindro neumático de traslación del brazo para transporte de la pieza
4. Pinza neumática para sujeción de piezas
5. Banda transportadora para traslado de la pieza
6. Sensor de presencia en el alimentador de piezas
7. Sensor de presencia al inicio de la banda transportadora
8. Sensor de presencia al final de la banda transportadora
9. Sensor de fin de carrera del cilindro alimentador
10. Sensor de fin de carrera de los cilindros del brazo (un sensor por cada cilindro)
11. Sensor de fin de carrera de la pinza neumática



*Figura 27.* Ambiente virtual digital electro-neumático



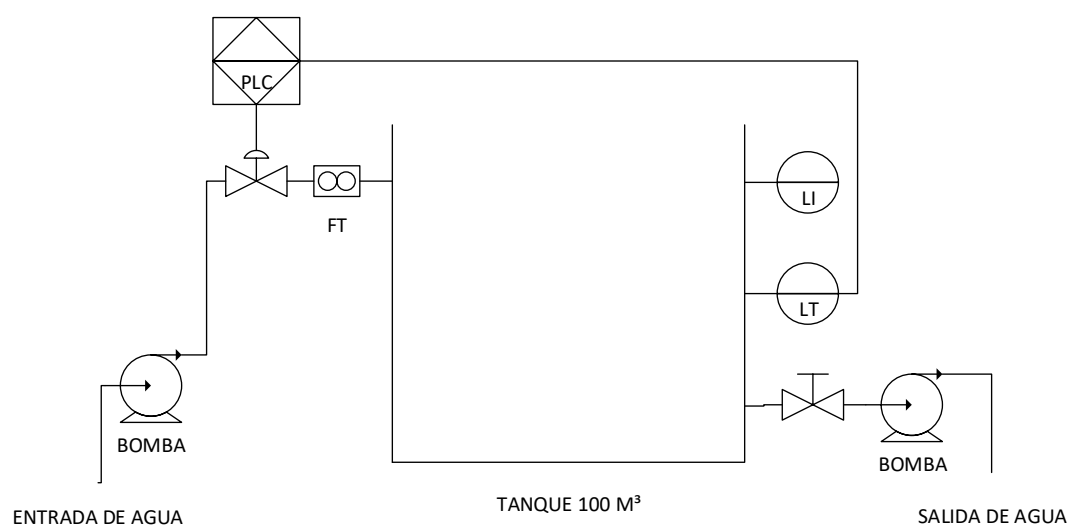
*Figura 28.* Esquema del ambiente virtual digital electro-neumático

El segundo ambiente virtual está diseñado para visualizar el nivel de un tanque de agua de 100 m<sup>3</sup> como muestra la

**Figura 29** y su diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) se puede observar en la **Figura 30**.



**Figura 29.** Ambiente virtual de la estación analógica (Tanque de 100m<sup>3</sup>)



**Figura 30.** Diagrama P&ID de la estación analógica

Todo el software de CAD para el diseño de las estaciones, tales como Festo Part Manager, AutoDesk 3DS MAX, AutoDesk Inventor fueron utilizados con su respectiva licencia estudiantil.

#### **2.4. Diseño Electrónico del módulo de E/S**




Para la fabricación del módulo de E/S que permitirá la vinculación de datos entre el sistema virtual (Sensores y actuadores virtuales) y el PLC, se tomarán las siguientes condiciones de diseño:

- Comunicación a través de Modbus TCP para variables analógicas.
- Aislamiento galvánico en entradas y salidas del módulo.
- Procesador de buen procesamiento de datos.
- Comunicación USB (Universal Serial Bus) con auto-reconexión en caso de ruptura en la comunicación.
- Señales de entradas y salidas a 24v.
- Conector SysLink IEEE 488 compatible con PLC Siemens de la MPS de Festo.
- Módulo Ethernet con auto-negociación de la velocidad de transferencia.

La

**Tabla 1** muestra una comparación entre microcontroladores, tanto en arquitectura ARM como en arquitectura AVR. En base a la **Tabla 2** observando estas características se determinó que el procesador STM32F103C8T6 es el adecuado para la adquisición de datos de las señales del PLC y del entorno virtual.

**Tabla 1**  
*Comparación entre microcontroladores*

Características	STM32F103C8T6	ATMEGA328P	PIC16F877A
<b>Imagen Preliminar</b>			
CPU Clock	72 MHz	20MHz	8MHz
RAM	20KB	2KB	0.36KB
Memoria de programa	64KB	32KB	14.3KB
Arquitectura	32 bits	8 bits	8bits

**Tabla 2**  
*Selección de controladores*

Características	STM32F103C8T6		ATMEGA328P		PIC16F877A		
	%	Ev	%	Ev	%	Ev	
<b>CPU Clock</b>	<b>30.00%</b>	4.00	1.20	1.00	0.30	1.00	0.30
<b>RAM</b>	<b>30.00%</b>	4.00	1.20	2.00	0.60	1.00	0.30
<b>Memoria de programa</b>	<b>30.00%</b>	4.00	1.20	2.00	0.60	1.00	0.30
<b>Arquitectura</b>	<b>10.00%</b>	3.00	0.30	1.00	0.10	1.00	0.10
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>15.00</b>	<b>3.90</b>	<b>6.00</b>	<b>1.60</b>	<b>4.00</b>	<b>1.00</b>
<b>Seleccionar</b>			<b>SI</b>		<b>NO</b>		<b>NO</b>



La comunicación entre el PLC y la tarjeta de interfaz se realiza mediante señales digitales bidireccionales, además para la comunicación de variables analógicas se utilizará el protocolo de comunicación Modbus TCP, ya que no todos los PLC cuentan con entradas y salidas analógicas de 4-20mA o 0-10v.

La siguiente **Tabla 3** muestra una comparación entre módulos de interfaz Ethernet a través de comunicación SPI. De acuerdo a la

**Tabla 4** observando las características propias de cada módulo se determinó que el integrado W5500 es el ideal para la aplicación, ya que posee auto-negociación de la velocidad de transferencia de datos, rompiendo así las barreras de enlace con PLC tanto de baja, media y alta gama. Además, es capaz de trabajar con 8 sockets de comunicación simultánea, por lo que es superior al ENC28J60.

**Tabla 3**

*Comparación entre módulos de interfaz Ethernet con comunicación SPI*

Características	ENC28J60	W5500
Imagen Preliminar		
Ethernet Bandwidth	10Mbps	10/100 Mbps
TX/RX RAM Buffer	8KB	32KB
Interface	SPI	SPI
SPI SPEED	20MHz	80MHz

**Tabla 4**  
*Selección de módulos de interfaz Ethernet*

Características	ENC28J60		W5500		
	%	Ev	%	Ev	%
Ethernet Bandwidth	40.00%	1.00	0.40	4.00	1.60
TX/RX RAM Buffer	40.00%	1.00	0.40	4.00	1.60
Interface	10.00%	2.00	0.20	2.00	0.20
SPI SPEED	10.00%	2.00	0.20	3.00	0.30
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>6.00</b>	<b>1.20</b>	<b>13.00</b>	<b>3.70</b>
<b>Seleccionar</b>		<b>NO</b>		<b>SI</b>	

Para la comunicación entre la tarjeta de adquisiciones y el entorno virtual se seleccionó USB por ser una comunicación universal entre computadores y dispositivos para PC. La **Tabla 5** muestra los protocolos de comunicación USB que se puede implementar.

Observando las características de la

**Tabla 6** se determinó que USB HID (Human Interface Device) es la mejor opción para la comunicación de los datos con el entorno virtual ya que no es necesario un controlador específico para la comunicación. Además de en caso de ruptura de la comunicación solo será

necesario reconectar el cable USB para que el sistema virtual se enlace automáticamente con el dispositivo de E/S.

**Tabla 5**  
*Protocolos de comunicación USB*

Características	USB CDC	USB HID
Uso típico	Emulación de puerto COM en serie	Entrada de datos periféricos
Velocidad	2 Mbps	2.5 Mbps
Ancho de banda	1-64 ms	No hay ancho de banda garantizado
Aplicación	Dispositivos de interfaz humana	Esta clase puede usarse para comunicación serial general
Reconexión automática a la ruptura	No	Sí

**Tabla 6**  
Selección de protocolos de comunicación USB

Características	%	USB CDC		USB HID	
		Ev	%	Ev	%
Uso típico	10.00%	2.00	0.2	3.00	0.3
Velocidad	30.00%	3.00	0.9	4.00	1.2
Ancho de banda	10.00%	2.00	0.2	1.00	0.1
Aplicación	10.00%	3.00	0.3	3.00	0.3






Reconexión automática a la ruptura	40.00%	1.00	0.4	4.00	1.6
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>11.00</b>	<b>2</b>	<b>15.00</b>	<b>3.5</b>
<b>Seleccionar</b>			<b>NO</b>		<b>SI</b>

Las salidas y entradas digitales se realizaron con la premisa de ser compatibles con los PLC Siemens S7-300 de las MPS de Festo del laboratorio de Mecatrónica, este conector de E/S digitales está normado por la IEEE 488, la **Tabla 7** comparativa de dispositivos para salidas y entradas, se muestra a continuación. En base a sus características se ha determinado que el optoacoplador PC817 es el adecuado para la aplicación, ya que es quien tiene un balance entre aislamiento galvánico (5kV) y frecuencia de entrada (1 kHz).

**Tabla 7**

*Comparativa de dispositivos para salidas y entradas*

Características	IRF530	PC817	RELÉ
<b>Imagen Preliminar</b>			
Desgaste Mecánico	No	No	Si
Frecuencia Máxima	1MHz	10KHz	55Hz
Aislamiento galvánico	100 V	5000 V	1500 V
Corriente Máxima	10 A	50 mA	10 A

**Tabla 8**

*Selección de elementos de conmutación*

Características	IRF530		PC817		RELÉ	
	%	Ev	%	Ev	%	Ev

<b>Desgaste Mecánico</b>	<b>30.00%</b>	2.00	0.60	2.00	0.60	0.00	0.00
<b>Frecuencia Máxima</b>	<b>20.00%</b>	4.00	0.80	2.00	0.40	1.00	0.20
<b>Aislamiento galvánico</b>	<b>40.00%</b>	1.00	0.40	4.00	1.60	2.00	0.80
<b>Corriente Máxima</b>	<b>10.00%</b>	2.00	0.20	1.00	0.10	2.00	0.20
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>9.00</b>	<b>2.00</b>	<b>9.00</b>	<b>2.70</b>	<b>5.00</b>	<b>1.20</b>
<b>Seleccionar</b>			<b>NO</b>		<b>SI</b>		<b>NO</b>

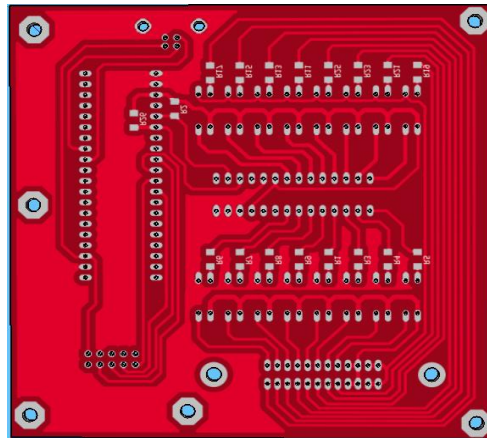
El circuito integrado MCP23017 se utilizó para expandir las entradas y salidas digitales, a través del bus I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), esto permite obtener 16 bits (8 entradas y 8 salidas digitales) a través del canal de comunicación entre el microcontrolador y el MCP23017.

El optoacoplador PC817 cumple dos funciones, la primera es aislar galvánicamente las entradas y salidas del circuito integrado MCP23017 y las entradas y salidas que vienen del PLC. La segunda función es la conversión de niveles de voltaje, ya que el MCP23017 funciona a 3.3 VDC y el PLC a 24 VDC.

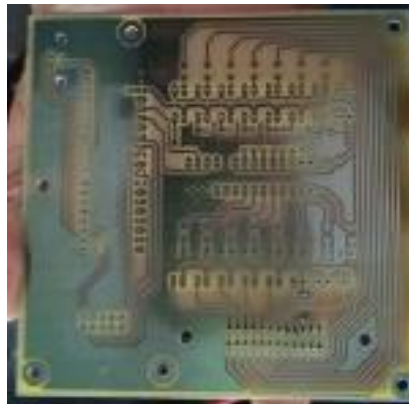
El módulo Ethernet W5500 es el encargado de convertir la trama Ethernet a un bus de comunicación SPI, este se comunica con el microcontrolador para ejecutar las peticiones ModBus TCP.

El microcontrolador STM32F103C8T6 tiene que la capacidad de ejecutar comunicaciones I<sup>2</sup>C, SPI, USB 2.0, entre otras. Este controlador ejecuta las comunicaciones, adquisición de datos y la pila de ModBus TCP en tiempo real, gracias a las librerías FreeRTOS.

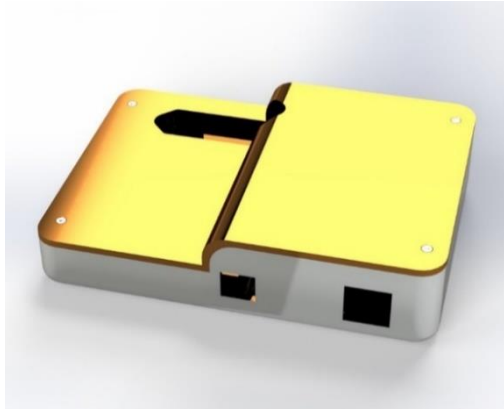
El plano electrónico se encuentra en el **ANEXO C**, todo el software de diseño electrónico, tales como: Eagle CADsoft y SketchUp fueron utilizados en sus licencias Freeware.



*Figura 31.* PCB del Módulo de E/S



*Figura 32.* PCB fabricada del módulo de E/S



**Figura 33.** Diseño de la carcasa del módulo de E/S



**Figura 34.** Carcasa fabricada en impresión 3D del módulo de E/S

## 2.5. Cálculos

Para las entradas y salidas se determinó el uso del optoacoplador PC817, el cual permite tener aisladas eléctricamente, tanto entradas como salidas. La siguiente **Tabla 9** indica los parámetros eléctricos de entrada del optoacoplador.

**Tabla 9**

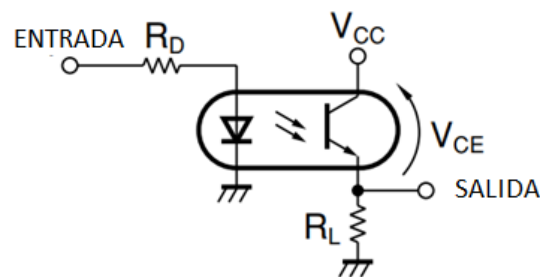
*Parámetros eléctricos del optoacoplador*

	Parámetro	Símbolo	Condición	MIN	TYP	MAX	Unidad
<b>ENT PAR</b>	Tensión directa	$V_F$	$I_F = 20mA$	-	1.2	1.4	V

Tensión de pico	$V_{FM}$	$I_{FM} = 0.5A$	-	-	3.0	V
Corriente inversa	$I_R$	$V_R = 4V$	-	-	10	$\mu A$
Capacitancia de terminal	$c_1$	$V = 0; f = 1kHz$	-	30	250	$\rho F$

Fuente: (SHARP, 2002)

La **Figura 35** muestra el diagrama eléctrico de configuración para la entrada del optoacoplador, está configuración se aplica tanto para las señales que envía el módulo de E/S (3.3v) como las señales que envía el PLC (24v).



**Figura 35.** Diagrama eléctrico de configuración

Fuente: (SHARP, 2002)

Entrada para 24v:

$$\frac{V_{entrada} - V_f}{I_f} = R_D$$

$$\frac{24 \text{ v} - 1.2 \text{ v}}{10 \text{ mA}} = R_D$$

$$R_D = 2,28 \text{ k}\Omega \approx 2.2 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{24 \text{ v} - 1.2 \text{ v}}{2.2 \text{ k}\Omega} = 10.36 \text{ mA}$$

**Ecuación 1.**

Entrada para 3.3v:

$$\frac{V_{\text{entrada}} - V_f}{I_f} = R_D$$

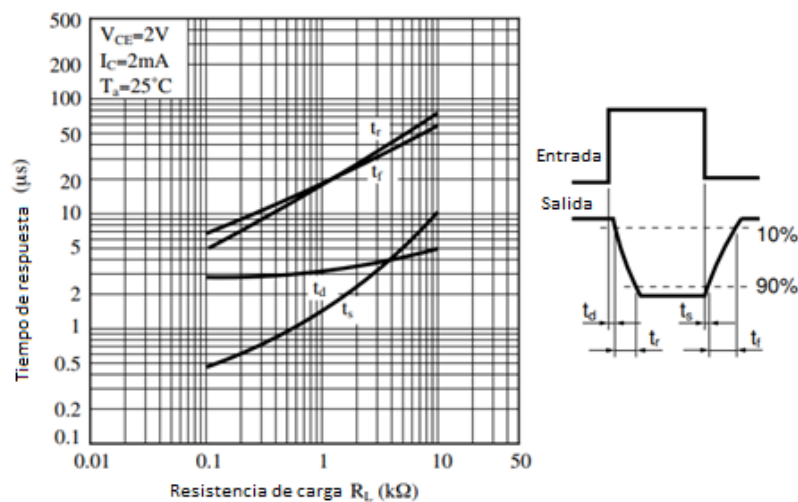
$$\frac{3.3 \text{ v} - 1.2 \text{ v}}{10 \text{ mA}} = R_D$$

$$R_D = 210 \Omega \approx 220 \Omega$$

$$\frac{3.3 \text{ v} - 1.2 \text{ v}}{220 \Omega} = 9.54 \text{ mA}$$

**Ecuación 2.**

Los valores de  $R_L$  para ambos casos (24 v y 3.3 v) se dimensionaron al valor de 1 k $\Omega$ , esto tomando en cuenta el grafico de la **Figura 36**, muestra el tiempo tiempos de subida y bajada de aproximadamente 20  $\mu\text{s}$ .



**Figura 36.** Resistencia con respecto al tiempo del optoacoplador

Fuente: (SHARP, 2002)

## 2.6. Conexiones eléctricas

Existen diferentes conexiones entre el módulo de E/S, el computador que ejecuta el ambiente virtual y el PLC. A continuación, se detalla cada una de las conexiones.

### 2.6.1. Conexión digital entre PLC y Módulo de E/S

La conexión de entradas y salidas digitales entre el PLC y el Módulo de E/S se la realiza mediante el cable SysLink de Festo, el cual tiene un conector IEEE 488 **Figura 37**.



**Figura 37.** Conector 24 pines hembra IEEE 488

Se conecta un extremo del cable en el puerto del PLC de la MPS Festo **Figura 38** y el otro extremo en el Módulo de E/S **Figura 39**.



**Figura 38.** Cable SysLink MPS Festo

Una vez realizadas las conexiones digitales se asegura con las vinchas de cada zócalo, tanto en la MPS Festo como en el Módulo de E/S.



*Figura 39.* Placa del Módulo de E/S

### 2.6.2. Conexión USB entre computador y Módulo de E/S

El entorno virtual que se va a ejecutar en el computador se comunica a través de comunicación USB-HID con el Módulo de E/S para enviar y recibir datos desde el PLC.

Para ello solo se conecta conectar el cable USB tipo B en el Módulo de E/S **Figura 40** y el otro extremo en el computador.



*Figura 40.* Puerto USB tipo B del Módulo de E/S

### 2.6.3. Conexión ModBus TCP entre PLC y Módulo de E/S

Cuando se ejecuten entornos analógicos en donde se vaya a implementar algún tipo de sistema de control, el PLC enviará y recibirá los datos a través del puerto Ethernet utilizando



Comunicación ModBus TCP, específicamente en la dirección IP 192.168.0.15 y el puerto 502.

Se debe conectar el extremo del cable Ethernet al Módulo de E/S **Figura 41** y el otro extremo en el PLC, o conectar el PLC y el Módulo de E/S en un Switch o Hub.



**Figura 41.** Puerto Ethernet del Módulo de E/S

## **CAPÍTULO III**

# **CONFIGURACIÓN VIRTUALIZACIÓN Y COMUNICACIÓN DE INTERFACES**

En este capítulo se tiene por objetivo realizar el análisis del modelo matemático del primer entorno que regirá la planta, que será simulada por Simulink y visualizará sus variables de manera tridimensional en el entorno virtual de Unity. Este primer entorno servirá para que el estudiante pueda crear controladores de diferentes tipos y analizar sus ventajas y desventajas.

Como segundo entorno se tiene una estación electro-neumática y su comportamiento será estrictamente programado en el software Unity. Este segundo entorno servirá para que estudiante programe secuencias mediante Ladder en los PLC del laboratorio de Mecatrónica.

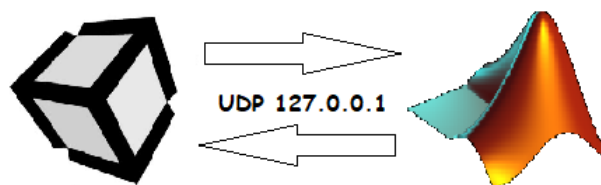
### **3.1. Modelado de sensores y actuadores del sistema**

Los sensores digitales de proximidad, finales de carrera de cilindros neumáticos, sensores inductivos, etc., son reflejados a través de la tarjeta como una señal eléctrica de 24VDC. El comportamiento del sensor virtual es programado con scripts de C# que son admitidos en el entorno de programación de Unity, permitiendo no solo generar una señal física que será reconocida por el PLC sino, además, poder generar una señal visual en el entorno virtual para el usuario. Estos scripts envían la información de los sensores virtuales en un paquete de datos a través de comunicación USB HID al módulo de E/S.

La tarjeta de E/S recibe el paquete y lo transforma en una salida (entrada al PLC) de sus pines digitales del microchip MCP28017, éste pasa a través del optoacoplador, resultando en una señal eléctrica que el PLC reconoce como 1 (24 VDC) o 0 (0 VDC).

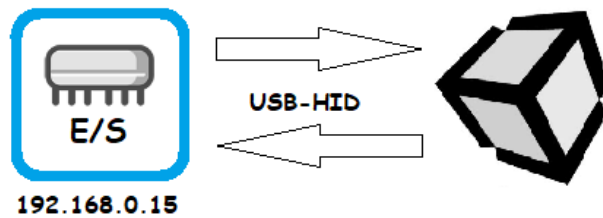
Las salidas eléctricas del PLC (entradas al módulo de E/S) son pasadas por el optoacoplador y enviadas al microchip de E/S MCP28017, el Microcontrolador lee la información de entradas (salidas del PLC) y envía el paquete de señales a través de USB HID, llegando la información al script de C# que comanda el entorno virtual. Estas señales de salidas del PLC activan o desactivan actuadores como válvulas electro-neumáticas, motores de bandas transportadoras, etc.

Para el caso de sensores virtuales analógicos, sus datos se encuentran en el modelo de Simulink, el cual a través de una conexión UDP (User Datagram Protocol) en la dirección 127.0.0.1 (localhost) pasa sus datos al entorno virtual de Unity como se muestra en la siguiente Figura 42.



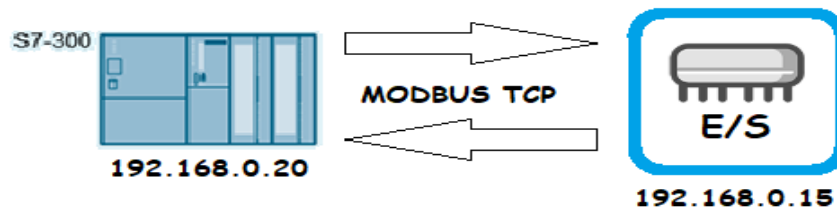
*Figura 42.* Conexión UDP

El entorno virtual de Unity transfiere los datos obtenidos del modelo de Simulink a través de la comunicación USB HID al módulo de E/S, como indica la siguiente **Figura 43**.



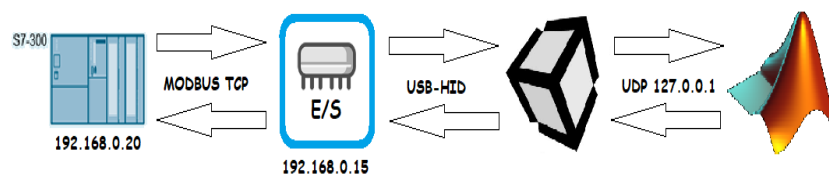
*Figura 43.* Comunicación USB HID

El módulo de E/S transfiere los datos en su tabla de Modbus TCP que es leída por el PLC a través del zócalo Ethernet del módulo WizNet W5500, como se aprecia en la **Figura 44**.



*Figura 44.* Datos transferidos a través de Modbus TCP

Las variables analógicas de salida del PLC deben ser enviadas a través de Modbus TCP, estas son leídas por el módulo de E/S y transfiere los datos por USB HID al entorno de Unity, este a su vez los envía por UDP al modelo de Simulink, creando una comunicación bidireccional de información para la implementación de controladores (PID (Proportional, Integral and Derivative), Lógica Difusa, etc.) como se observa en la **Figura 45**.



*Figura 45.* Comunicación bidireccional entre el ambiente virtual y el PLC

### 3.2. Estimación del modelo matemático de la estación real

La planta a simular, es una planta de nivel, consta de una entrada de agua a presión constante, una válvula proporcional lineal, un tanque abierto (tanque no presurizado) y válvulas de salida. El caudal de salida de la bomba es directamente proporcional a la apertura de la válvula proporcional.

El flujo de salida del tanque está dado por:

$$Q = Sv = s\sqrt{2gH} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

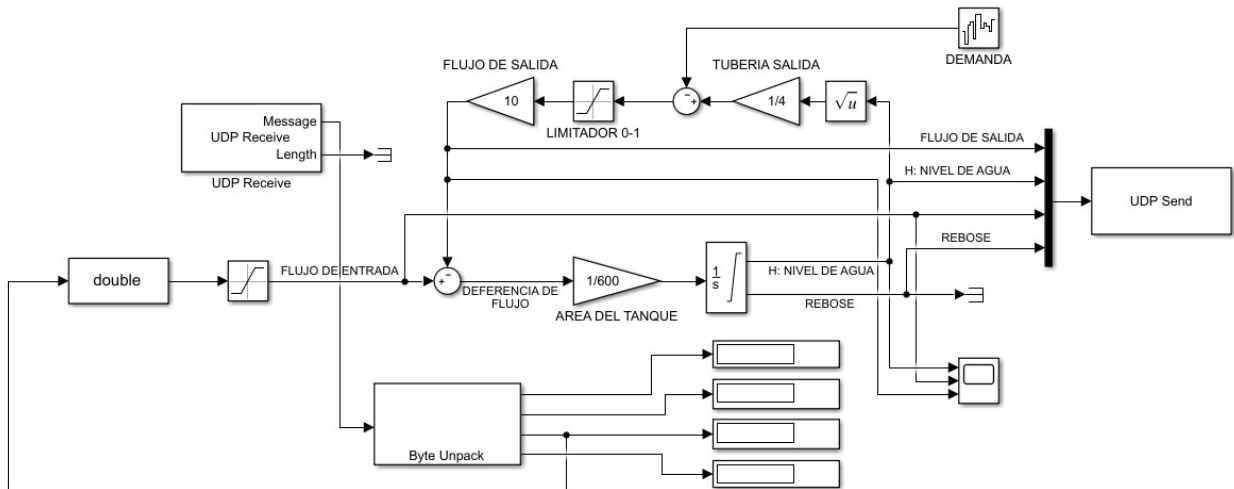
$$Q = \text{Caudal de salida del tanque}$$

$$S = \text{Área o sección de salida}$$

$$g = \text{Gravedad}$$

$$H = \text{Altura del tanque}$$

El caudal de salida es afectado por una válvula proporcional de salida, la cual será un factor multiplicador [0, 1] en la ecuación anterior (este factor viene predeterminado en el modelo matemático de Simulink). Si el flujo de entradas restando el flujo de salida, se obtendrá el flujo que se queda en el tanque, y al dividir para el área del tanque, se puede calcular el nivel o altura del líquido en el tanque. Además se añadió un bloque de señales aleatorias que pueden aumentar o disminuir la demanda del sistema, lo que permitirá realizar pruebas de funcionamiento de los controladores. El modelo descrito se lo realizó en Simulink y se lo puede observar en la **Figura 46**.



**Figura 46.** Ejemplo de estimación de un modelo matemático en Simulink

### 3.3. Combinar el modelado matemático con el entorno virtual

La comunicación entre la simulación del modelo y el entorno virtual es de vital importancia. Para que exista una comunicación bidireccional entre la simulación del modelo matemático de Simulink y el entorno virtual de Unity, se utilizó una comunicación UDP con la dirección localhost, ya que la comunicación UDP es más rápida que TCP. Esto permite obtener la comunicación de variables del modelo matemático y el entorno virtual sin utilizar software propietario u OPC (OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control), ya que no existen OPC de código abierto para C#.

Para optimizar los recursos del computador al iniciar el modelo, se compila el modelo de Simulink a un ejecutable de Windows, de esta manera ya no es necesario abrir el programa Simulink para la simulación del modelo, reduciendo memoria y uso del procesador del computador.

### **3.4. Programación de algoritmos para la animación del entorno**

La visualización del proceso industrial a controlar está ligado a las variables del modelo matemático a través de comunicación UDP.

Unity a través de sus scripts de programación permite modificar el entorno virtual, a esto se lo llama animaciones del entorno, permitiendo al usuario ver el comportamiento real de la planta no solo en datos numéricos, sino también como una representación del mundo real. Las animaciones del entorno pueden ser desde movimientos lineales, texturas en movimiento, salida de vapor, llamas, etc.

### **3.5. Programación de la comunicación del entorno virtual con el módulo de E/S**

Unity además de animar el entorno virtual con las variables que recoge del modelo matemático, también envía los datos de las variables al módulo de E/S a través de la comunicación USB HID, permitiendo que estos datos sean reflejados como una señal eléctrica o a su vez sea manifestada en una tabla de Modbus TCP, a la cual el PLC puede acceder.

### **3.6. Implementación del software final**

Es importante recalcar que los procesos de comunicación USB HID (Unity – Módulo E/S), UDP (Unity – Modelo matemático) y animaciones del entorno se realizan de manera paralela, es decir utilizando Threads (Hilos) en la programación de los scripts C# dentro del entorno de Unity.

De la misma manera, el procesador del módulo de E/S tendrá que recolectar señales eléctricas digitales desde el PLC, mantener el funcionamiento como esclavo Modbus TCP y

la comunicación USB HID en procesos en paralelo. Ya que no existen Threads en ARM, se utiliza FreeRTOS (Real Time Operating System), software libre que permite al procesador ejecutar tareas en paralelo como lo haría un Sistema Operativo.

El software de programación del entorno virtual y del procesador del módulo E/S, son Visual Studio 2017 Xpress, Unity 3D Personal y Arduino IDE, todos los software fueron de licencia libre y no privativa.

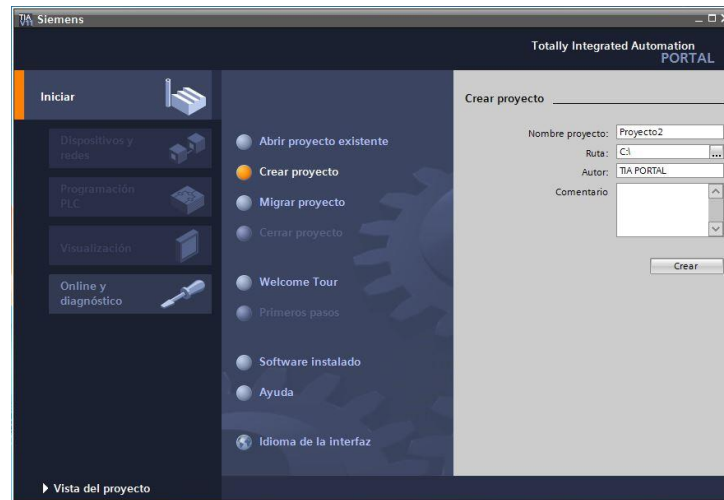
### **3.7. Configuración del cliente Modbus TCP en TIA Portal**

El módulo de E/S incorpora un puerto Ethernet, el cual tiene un servidor Modbus TCP preconfigurado con la dirección IP 192.168.0.15. Este servidor Modbus TCP tiene una tabla de registros (Inputs, Coils, Input Registers y Holding Registers), los cuales reflejan datos de sensores y actuadores tanto digitales como analógicos que están previamente enlazados con el ambiente virtual.

La configuración de conexión entre el servidor Modbus TCP (Módulo E/S) y el cliente (PLC Siemens) se mostrará a continuación, teniendo en cuenta que dentro del software TIA Portal se parametrizará la conexión y los datos de lectura serán almacenados en bloques de datos y de la misma manera para la escritura. Los datos almacenados deben ser utilizados para la supervisión y control de la planta, es por ello que los datos de entrada servirán para determinar una salida del controlador. En lo que respecta a datos analógicos de la planta todo será utilizando Modbus TCP y el tablero de la MPS Festo que son entradas y salidas físicas de pulsadores están ligadas a través del cable con conector SysLink (IEEE 488). Posibilitando la puesta en marcha y parada de la planta con pulsadores, selectores que el estudiante accionará de manera física y las variables analógicas a través de un HMI (Human Interface



Device). Se procede a crear el proyecto en TIA Portal y configurar el hardware como indica la **Figura 47**. Se configura la dirección IP del controlador y se agregan todos los equipos Siemens que se comunicarán (HMI, ProfiBus Slave, etc.).



**Figura 47.** Creación del proyecto en TIA Portal

Para el ambiente virtual de control de nivel se dispone de la comunicación Modbus predefinida la cual se muestra a continuación en la **Tabla 10**:

**Tabla 10**  
*Registros de Modbus*

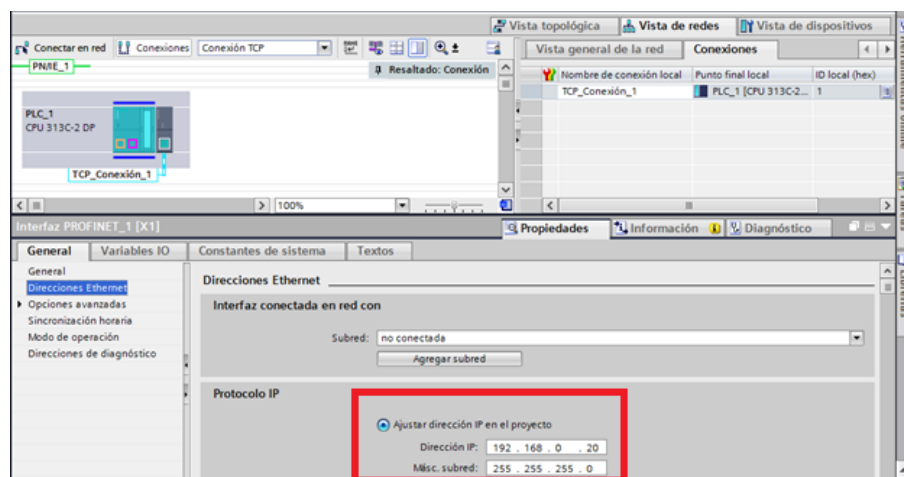
Registro	Rango	Descripción
40002	[1.175494*10 <sup>-38</sup> a 3.402823*10 <sup>38</sup> ]	Variable de nivel en coma flotante
40003		
40004	[1.175494*10 <sup>-38</sup> a 3.402823*10 <sup>38</sup> ]	Variable de señal de control
40005		
40006	[0 - 255]	Byte de entradas digitales
40007	[0 - 255]	Byte de salidas digitales
40008	[0 - 255]	Byte de habilitación de salidas a través de MODBUS TCP

La **Tabla 10** indica que la variable del nivel de agua está dada por un tipo REAL y será accedido desde el registro 40002 hasta el 40003, ya que el tipo REAL se compone de 2 WORD's (4 Bytes).

Para asignar la consigna de posición de la válvula proporcional se colocará un valor entero desde 0.00 a 10.00, que corresponderá al paso de caudal a través de la válvula proporcional respectivamente, este valor será asignado desde el registro 40004 hasta el 40005 ya que se necesita un REAL dentro de TIA Portal.

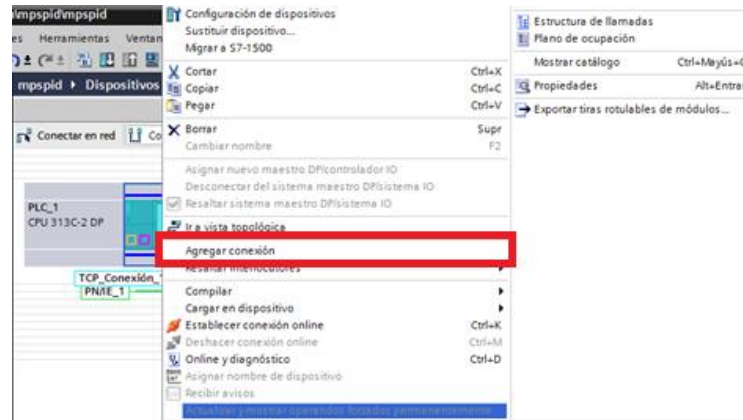
Los parámetros de configuración Modbus se detallan a continuación:

Luego de crear el proyecto, se agrega el CPU (S7-300 CPU315) a utilizar y los módulos de E/S y de comunicación (CP343-Lean). Una vez esté listo el hardware a utilizar se asignará una dirección IP (192.168.0.20) y una subred a la estación como se muestra en la siguiente **Figura 48**.



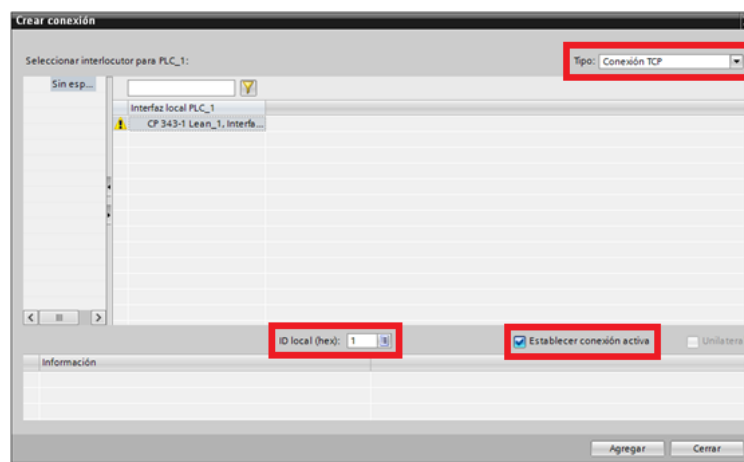
**Figura 48.** Asignar una dirección IP a la estación

1. Lo siguiente a configurar es una red TCP para la comunicación Modbus TCP, para ello se da clic derecho en la CPU y luego clic en la opción **Agregar conexión** como se indica en la *Figura 49*.



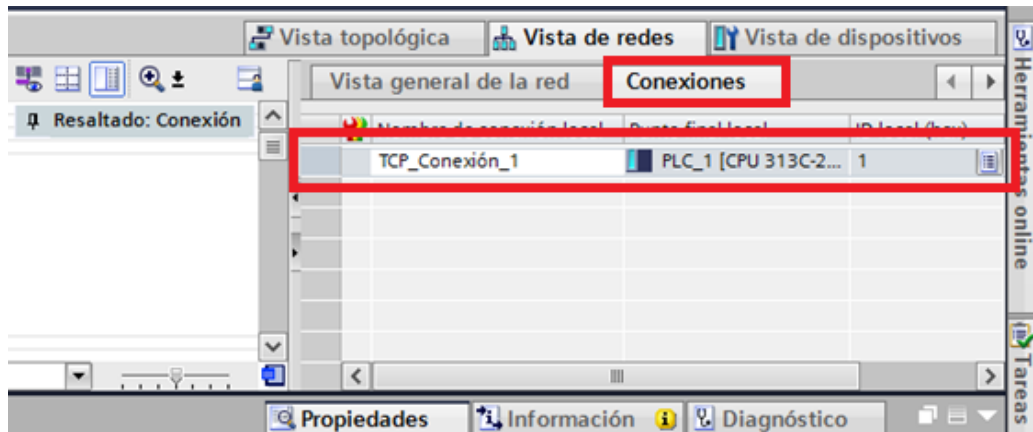
*Figura 49.* Configurar una red TCP

2. En consiguiente la ventana que se observa en la *Figura 50* se selecciona el Tipo de conexión (Conexión TCP), se coloca el ID local (1) el cual, se utilizará luego en la programación dentro del OB1 (Principal) y OB100 (Reinicio completo), además de habilitar la opción Establecer conexión activa.



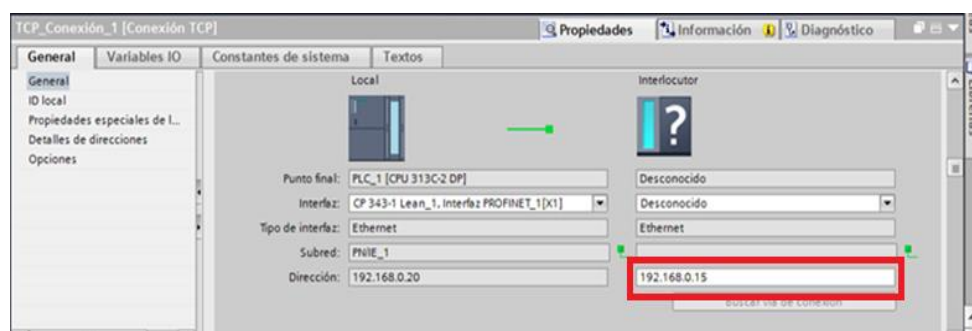
*Figura 50.* Tipo de conexión TCP

3. En la siguiente imagen se verá la conexión TCP creada en la pestaña Conexiones al lado derecho de la ventana del TIA Portal como muestra la **Figura 51** y se dará un clic izquierdo y se procede al siguiente paso.



**Figura 51.** Configuración TCP

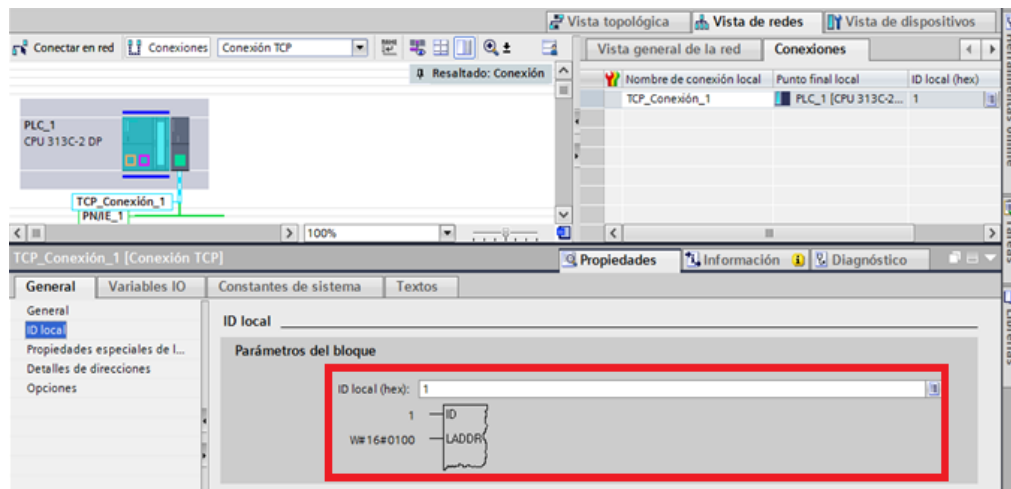
4. El siguiente paso en la configuración TCP es asignar la IP (192.168.0.15) del servidor Modbus TCP en la pestaña **General** de la conexión TCP configurada anteriormente como se observa en la **Figura 52**.



**Figura 52.** Asignación de IP al servidor Modbus TCP

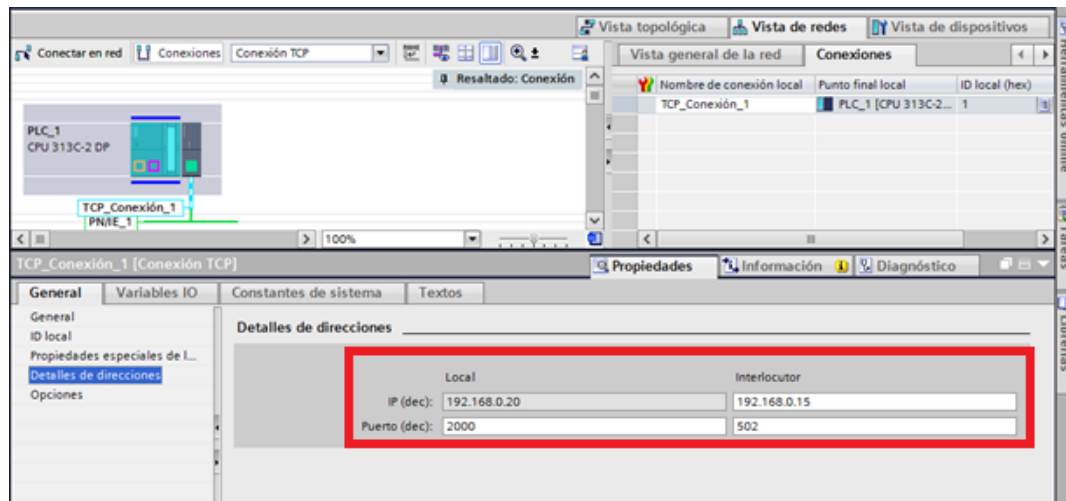
5. En la siguiente pestaña **ID local** se ve el **ID** (1) configurado en el paso 3, y también se observará el parámetro **LADDR** ( $W\#16\#100 = 0x100h = 256$ ) que posteriormente se

utilizará en la configuración del bloque Modbus TCP. La configuración se indica en la **Figura 53**.



**Figura 53.** Configuración ID local

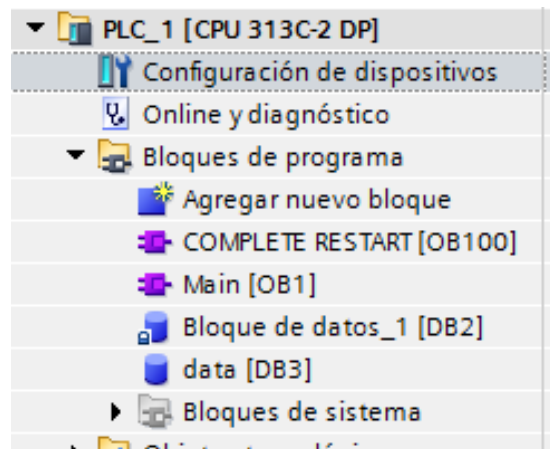
6. A continuación, en la pestaña **Detalles de direcciones** se configurará el puerto del interlocutor que es el mismo de acceso TCP de Modbus TCP (502) al servidor y en puerto local que se utilizará para leer la trama (2000), a continuación, la **Figura 54** muestra los parámetros.



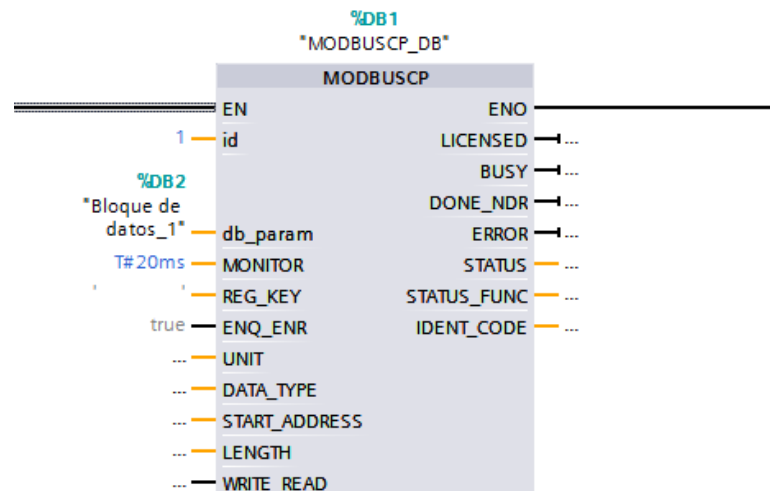
**Figura 54.** Configuración del puerto interlocutor

7. Ahora que ya se encuentra configurada la conexión TCP del módulo de comunicaciones CP434-Lean se procede a agregar el bloque de comunicación Modbus TCP en los **OB1** y **OB100** respectivamente como indica la **Figura 55**, a continuación, en la **Figura 56** se observa los bloques a acceder los parámetros del bloque Modbus TCP.

- Recordar que en la imagen (b) el **id** es el ID configurado en el paso 3.
- El parámetro **db\_param** es un bloque de datos que se debe configurar para almacenar los parámetros de la petición Modbus TCP para leer o escribir.
- El parámetro **MONITOR** es el tiempo (20ms) entre una solicitud y la siguiente petición.



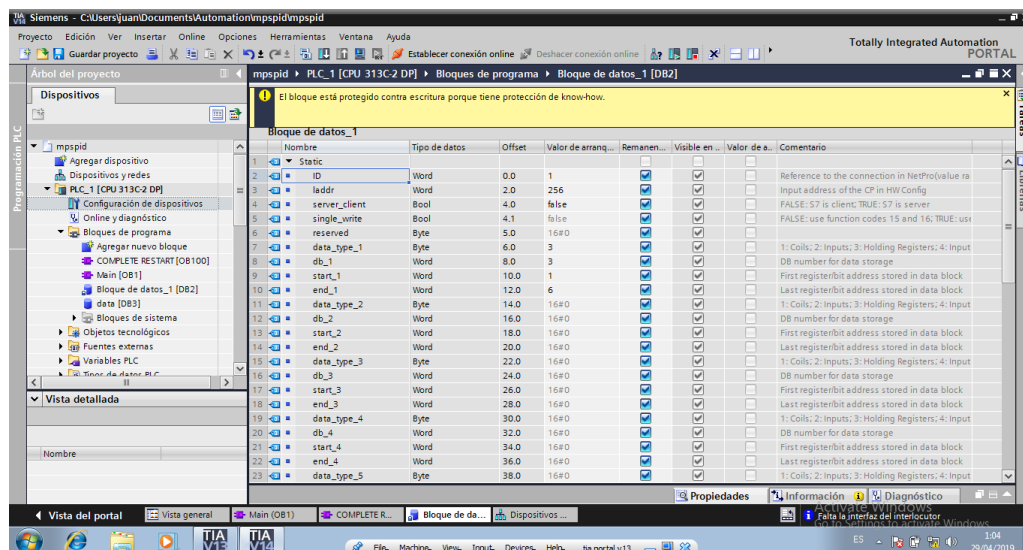
**Figura 55.** Bloques de Comunicación Modbus TCP



**Figura 56.** Parámetros del bloque Modbus TCP

8. Y por último la siguiente **Figura 57** es de la asignación (Valor de arranque) de valores del bloque de datos de configuración para las peticiones Modbus TCP.
- Se debe asignar en el valor **ID** (1) el valor configurado en el paso 3.
  - Luego el parámetro **laddr** (256) se asigna el valor del paso 6.
  - El parámetro **server\_client** se configura en false, lo que quiere decir que el bloque tendrá la función de cliente Modbus TCP.

- El siguiente paso es asignar un valor al parámetro **data\_type\_1** (3) lo cual nos indica que es un valor de tipo WORD.
- El parámetro **db\_1** (3) se asigna al número de Bloque de datos (%DB3) a guardar los valores.
- Los parámetros **start\_1** (1) y **end\_1** (6) indican el inicio y fin de los registros a leer (40001 – 40006).



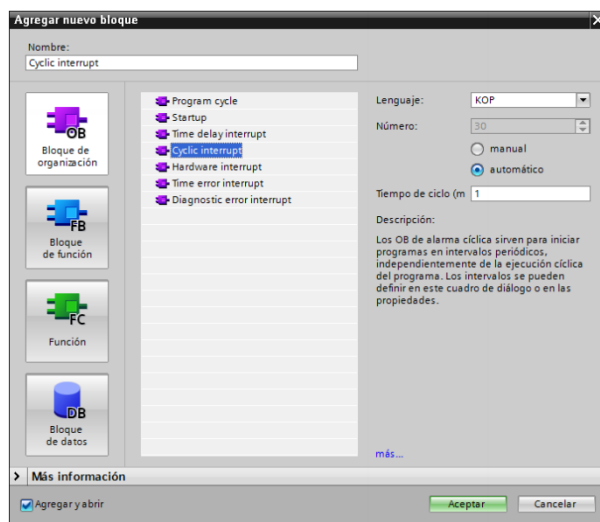
**Figura 57.** Valores del bloque de datos de configuración Modbus TCP

### 3.8. Configuración de controlador PID en el software TIA Portal

Los PLC de la marca Siemens incorporan bloques de controladores PID, los cuales, a través de una parametrización de los bloques, se consigue un controlador para un rango de operación de la planta.

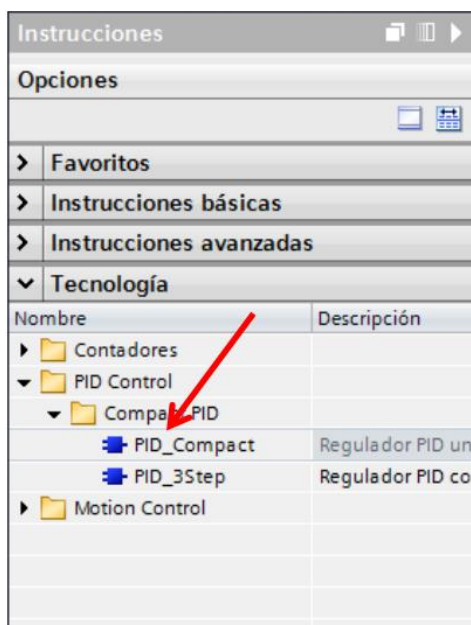
Primero agregue un OB de alarma cíclica, el cual se ejecutará en el tiempo establecido (1ms) como se observa en la **Figura 58**.





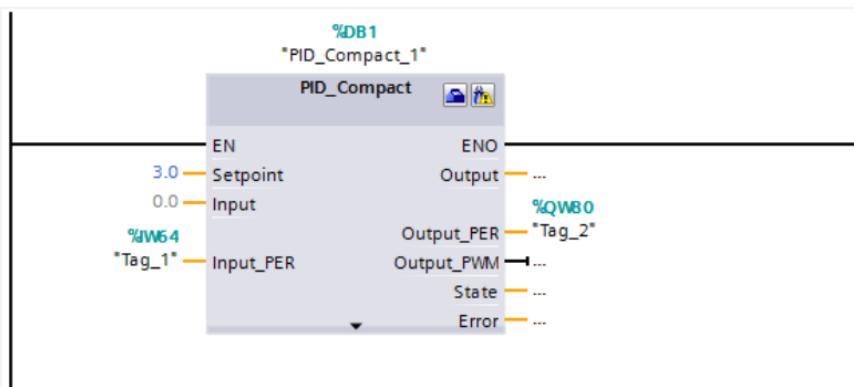
**Figura 58.** Bloque de organización de alarma cíclica

Abra, en la ventana "Instrucciones", el grupo "Tecnología" y la carpeta "PID Control". La carpeta contiene todas las instrucciones para los reguladores del software que se pueden configurar en la CPU como se observa en la **Figura 59**.



**Figura 59.** Instrucción PID dentro de TIA Portal

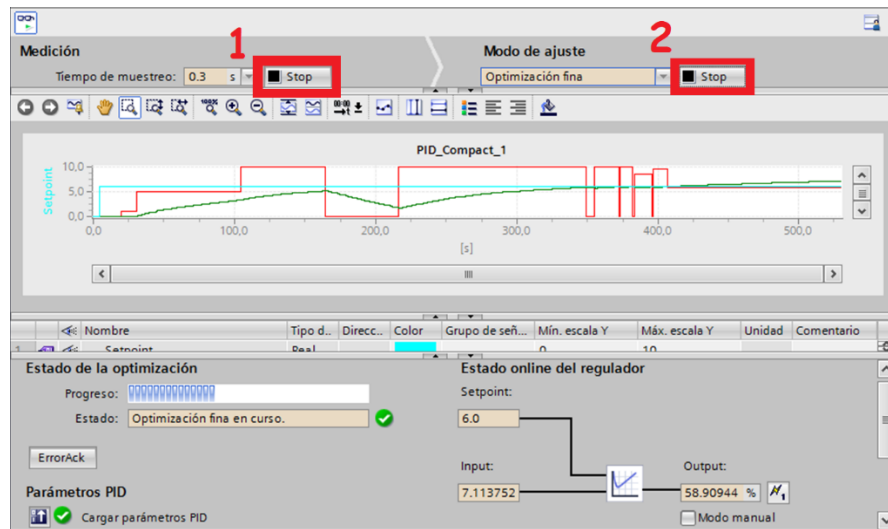
Seleccione la instrucción y arrástrela al OB de alarma cíclica correspondiente. Se abre el cuadro de diálogo "Opciones de llamada". En la lista "Nombre" seleccione un objeto tecnológico o introduzca el nombre del nuevo objeto tecnológico. Como se observa en la **Figura 60** el bloque se encuentra ya dentro del bloque de organización de alarma cíclica.



**Figura 60.** Bloque PID dentro del diagrama escaler del bloque cíclico

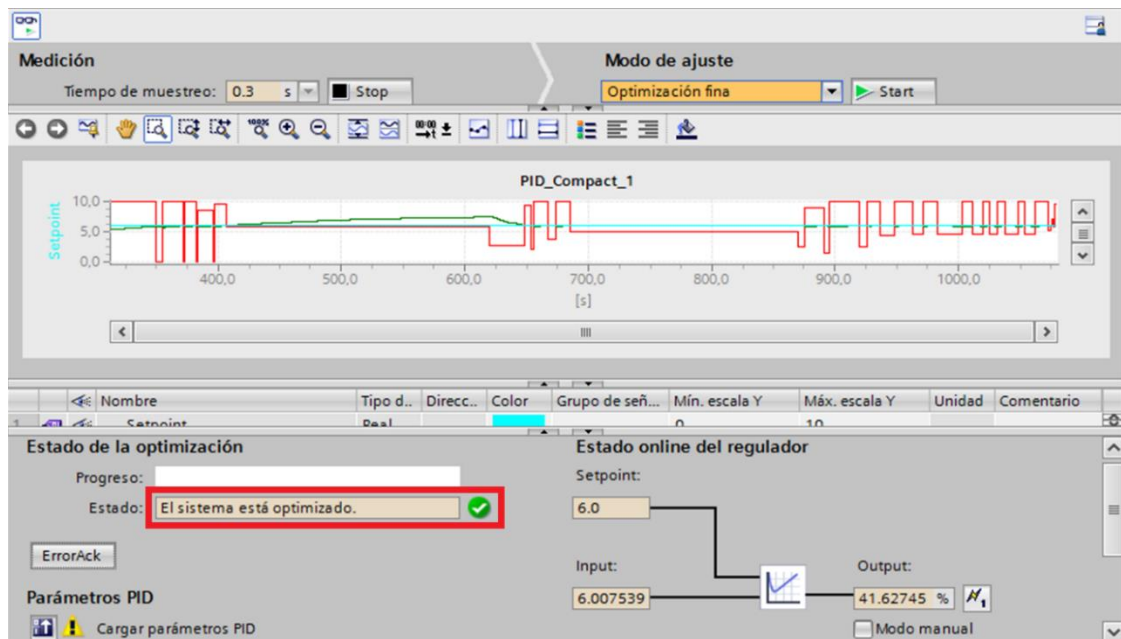
Para la configuración, sintonización y puesta en marcha del PID se procede configurando las entradas y salidas del controlador, sus límites superiores e inferiores tanto en la entrada como en la salida.

Como se aprecia en la siguiente **Figura 61** se realiza un muestreo (1) de las señales del bloque PID: Consigna (Cian), Variable del proceso (Verde) y Salida (Rojo), el bloque de PID realiza una sintonización (2) en función de perturbaciones a la planta.



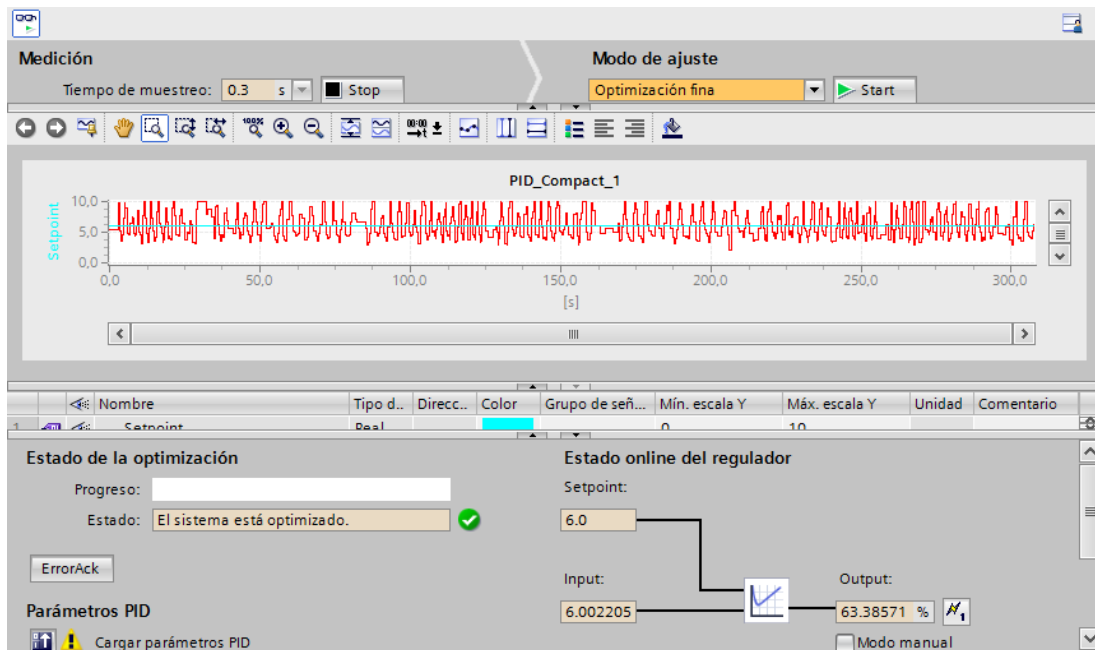
*Figura 61.* Muestreo de señales del bloqueo PID

Una vez finalizado el proceso de ajuste y optimización el PID queda en marcha para el control de la variable como indica la **Figura 62**.



*Figura 62.* Sistema optimizado luego de la sintonización

Como se observa en la siguiente **Figura 63** el PID aunque regula la planta tiene oscilaciones de gran amplitud y frecuencia, estos resultados se analizará en el capítulo siguiente para realizar la comparativa en entre controladores PID vs Lógica Difusa.



**Figura 63.** Funcionamiento del PID

### 3.9. Diseño de controlador de Lógica Difusa dentro de un PLC Siemens

Para el diseño del controlador se utilizará la herramienta de diseño de controladores de Lógica Difusa en el software MatLab.

Es importante recalcar que el diseñador del controlador debe conocer muy bien su planta, ya que las funciones de membresía y conjuntos difusos serán determinadas por el diseñador del controlador.

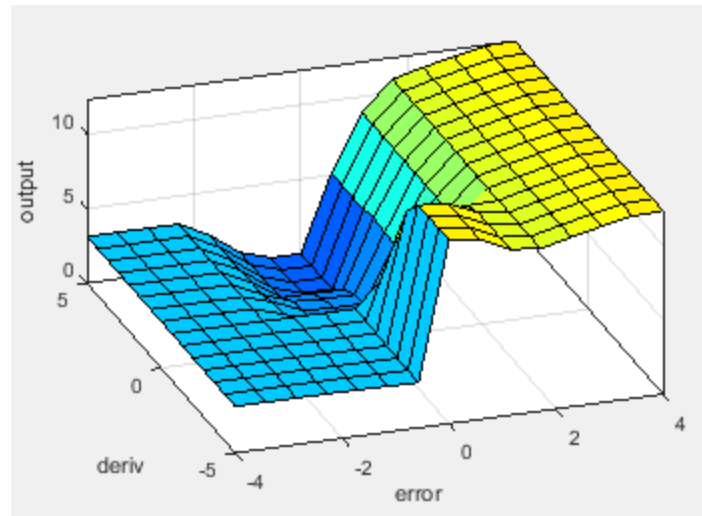
Para el diseño del controlador difuso primero se configuran los conjuntos de entrada y salida. Para el caso del ambiente de nivel el controlador difuso tendrá dos entradas (Error y

derivada del error) y una salida (válvula proporcional). La señal de control de la válvula proporcional será enviada por el PLC a través de ModBus TCP y tiene un rango de 0-10 VDC.

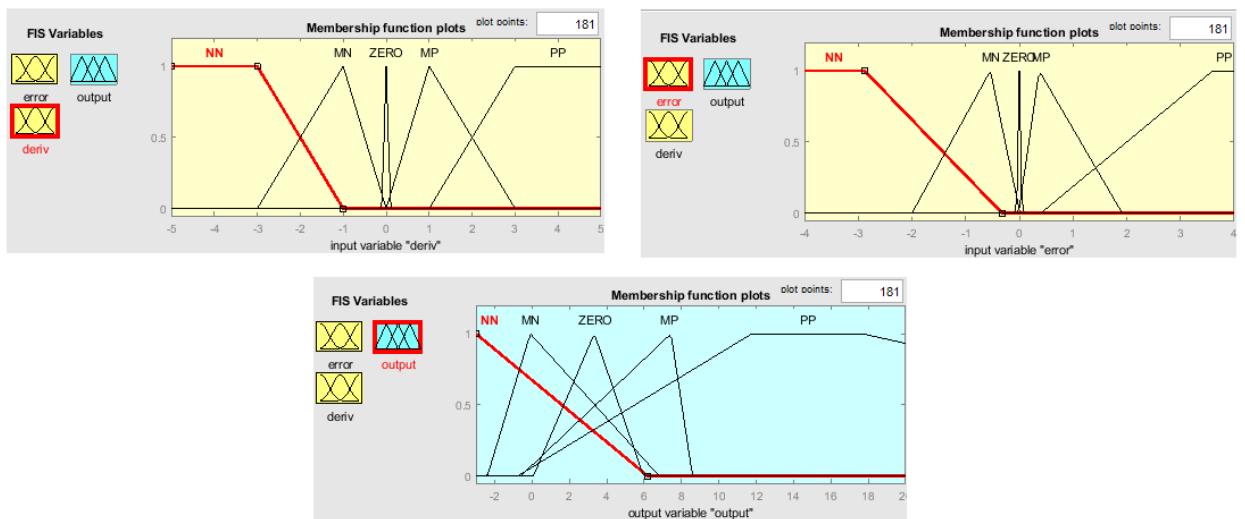
Se determinó los conjuntos de entrada en función de la necesidad de corregir el error y anticipar el error, y un solo conjunto de salida ya que la planta tiene un solo actuador. Las funciones de membresía de cada conjunto inicialmente se las realizó con 3 funciones triangulares por cada conjunto, luego en pruebas se determinó que sería necesario reducir el área de la función del error cero para que el controlador tenga el menor error posible. Las pruebas siguientes resultaron en saltos muy grandes de la señal de control por lo que se procedió a añadir dos funciones más por cada conjunto, resultando en 5 funciones de membresía por cada conjunto.

Otras pruebas determinaron que las funciones de los extremos de cada conjunto podrían ser trapezoidales para que cuando el error o su derivada sean muy alejada del cero, el controlador envíe toda la señal de control. Las reglas del controlador difuso se las realizó mediante un análisis lógico de cómo debería actuar un operador ante las diferentes situaciones de la planta.

La **Figura 64** muestra los conjuntos de entrada (error, derivada del error y salida), sus funciones de membresía se indican en la **Figura 65** y en la **Figura 66** se observa las reglas del control difuso.



**Figura 64.** Conjuntos de entrada



**Figura 65.** Funciones de membresía

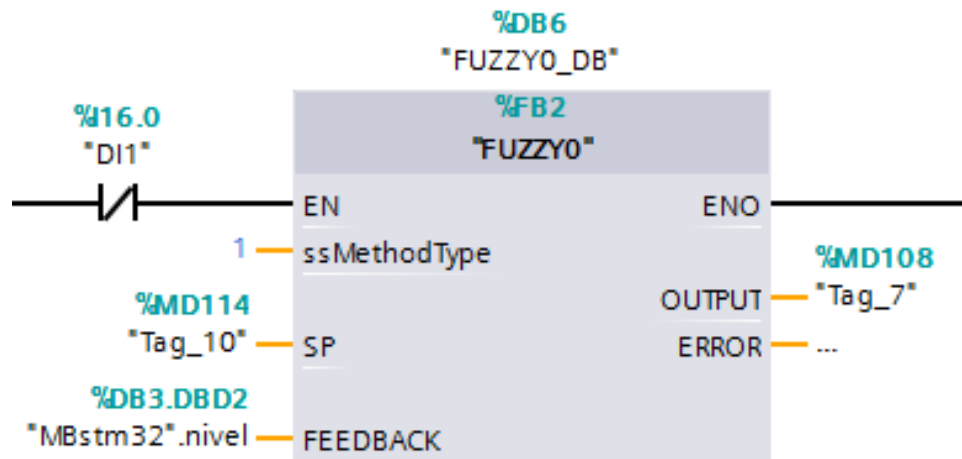
1. If (error is NN) then (output is ZERO) (1)
2. If (error is MN) and (deriv is ZERO) then (output is MN) (1)
3. If (error is MN) and (deriv is PP) then (output is NN) (1)
4. If (error is MN) and (deriv is MN) then (output is ZERO) (1)
5. If (error is MN) and (deriv is MP) then (output is MN) (1)
6. If (error is MP) and (deriv is NN) then (output is PP) (1)
7. If (error is MP) and (deriv is ZERO) then (output is MP) (1)
8. If (error is MP) and (deriv is PP) then (output is ZERO) (1)
9. If (error is MP) and (deriv is MN) then (output is MP) (1)
10. If (error is MP) and (deriv is MP) then (output is ZERO) (1)
11. If (error is PP) then (output is PP) (1)
12. If (error is ZERO) and (deriv is ZERO) then (output is ZERO) (1)
13. If (error is ZERO) and (deriv is MP) then (output is MN) (1)
14. If (error is ZERO) and (deriv is MN) then (output is MP) (1)
15. If (error is ZERO) and (deriv is NN) then (output is PP) (1)
16. If (error is ZERO) and (deriv is PP) then (output is NN) (1)

**Figura 66.** Reglas del control difuso

Luego de tener el controlador diseñado con sus conjuntos, funciones de membresía y reglas se traslada al entorno Simulink para luego ser exportado mediante la herramienta PLC Coder que exporta el código del controlador al formato SCL (Código estructurado de programación de PLC).

Al interior de TIA Portal se importa el código SCL y se genera los bloques de función dentro del PLC. En la **Figura 67** se observa la configuración de parámetros del bloque de programación generado desde MatLab/Simulink el cual pide la consigna y la variable de retroalimentación y da una salida.

Los controladores expuestos son exclusivamente pruebas para demostrar la hipótesis de la tesis, es responsabilidad de los estudiantes que realicen pruebas y optimicen los controladores de acuerdo a sus criterios de diseño.



*Figura 67.* Configuración de parámetros del bloque de programación



## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se detalla el proceso de pruebas del módulo de E/S, tanto en comunicación, adquisición de señales eléctricas, recolección de datos Modbus TCP y su comunicación con el entorno virtual, modelo matemático y sistemas de control.

#### 4.1. Pruebas de adquisición de señales del módulo de E/S

El módulo de E/S está diseñado con el conector IEEE 488 para ser compatible con el módulo MPS de Festo y aprovechar la comunicación con el PLC Siemens S7-300.

Se procedió a realizar las pruebas de E/S con el PLC Siemens de la estación MPS Festo, mediante un programa con el que se monitorea las E/S que recibe y envía el PLC desde el módulo E/S.

#### 4.2. Pruebas del PLC con el ambiente virtual

Se realizó una prueba del primer ambiente virtual (E/S digitales), con el cual se pudo controlar el ambiente desde un programa de usuario que se ejecuta en el PLC Siemens S7-300.

#### 4.3. Pruebas de comunicación MODBUS TCP

Se realizaron pruebas sobre la comunicación ModBus TCP utilizando el software MBPoll. En la siguiente **Figura 68** se aprecia la cantidad de datos recibidos del servidor Modbus TCP (1008560, más de un millón de peticiones procesadas a una tasa de actualización de 1 milisegundo sin colapso de la red o del servidor).

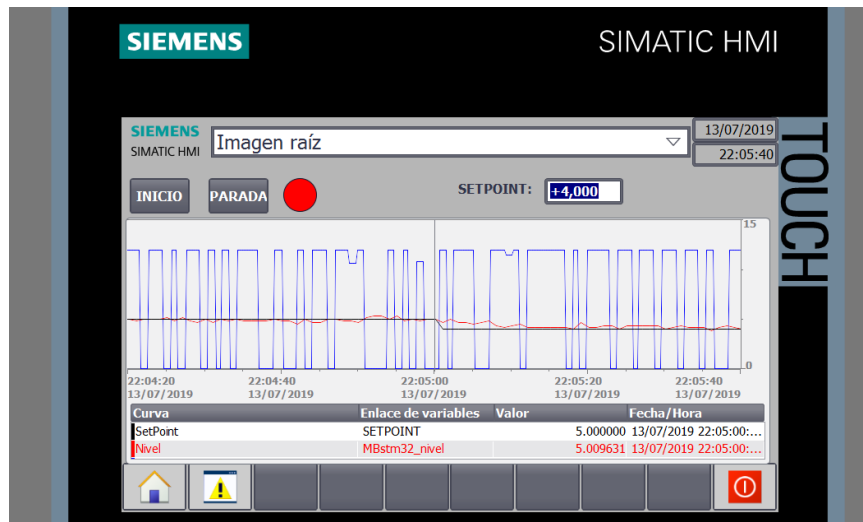
	Alias	4x0000
1	ANALOGICO	2283
2	ENTRADA ANALOGICA	0
3		--
4	SALIDA DE CONTROL	0
5		--
6	ENTRADAS DIGITALES	0
7	SALIDAS DIGITALES	0
8	BITS DE HABILITACION	0
9		
10		

**Figura 68.** Pruebas de comunicación Modbus TCP

#### 4.4. Pruebas finales

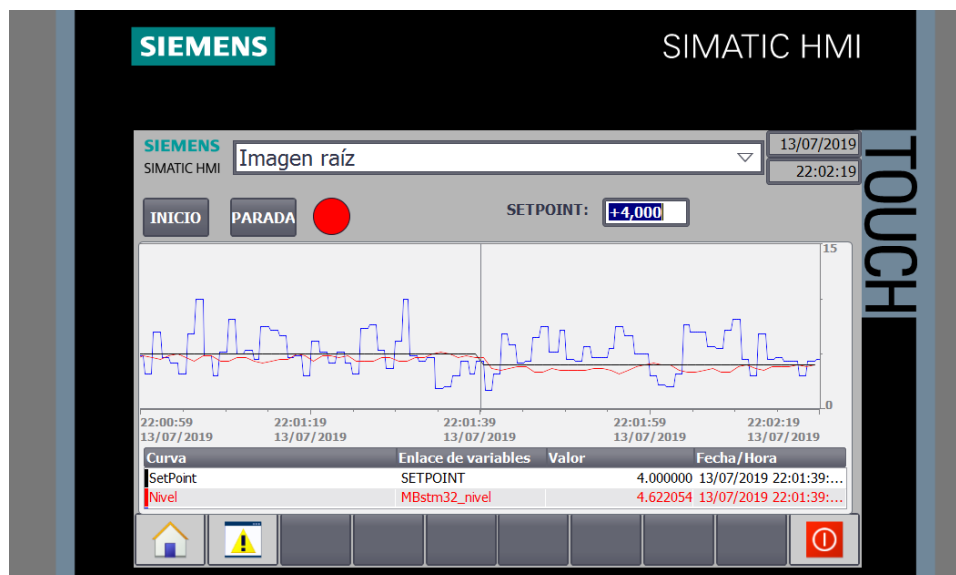
Se realizó una comparativa entre los controladores PID y Lógica Difusa ejecutados desde el PLC a través de Modbus TCP, para controlar un proceso que en el segundo ambiente virtual será un control de nivel de tanque.

La **Figura 69** muestra al lado izquierdo la señal de control enviada a la planta para estabilizar la variable de control y al lado derecho se nota un cambio de la consigna por debajo del valor anterior, apreciando las amplitudes y frecuencia de la señal de control del PID configurado en el PLC.



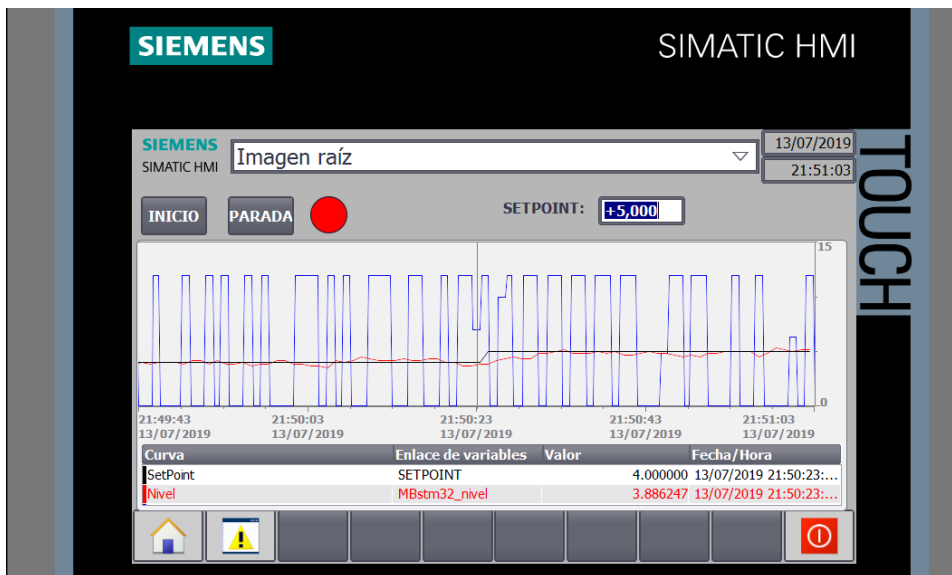
**Figura 69.** Señal de control enviada a la planta

La **Figura 70** indica la respuesta del controlador de Lógica Difusa, al lado izquierdo se observa la señal de control en estado estable del controlador y al lado derecho un cambio de la consigna por debajo del valor anterior de la misma, se observa una amplitud y frecuencia reducidas en comparación con el PID sintonizado con el software TIA Portal.



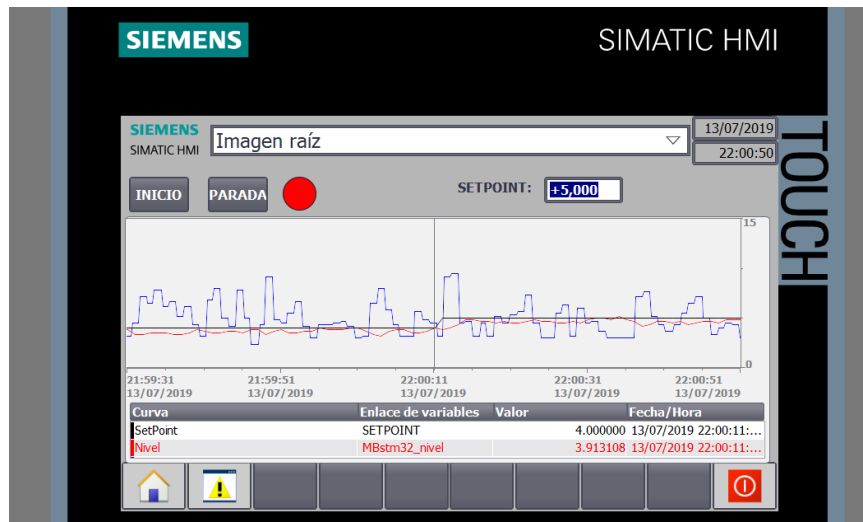
**Figura 70.** Respuesta del controlador de Lógica Difusa

En la **Figura 71** se observa el controlador PID propio del PLC Siemens el cual luego de mantener el valor de consigna se le realizó un cambio de consigna superior al valor anterior de la misma. Como se observa la señal de control llega a su amplitud máxima y al momento de estabilizar tiene gran amplitud y frecuencia alta.



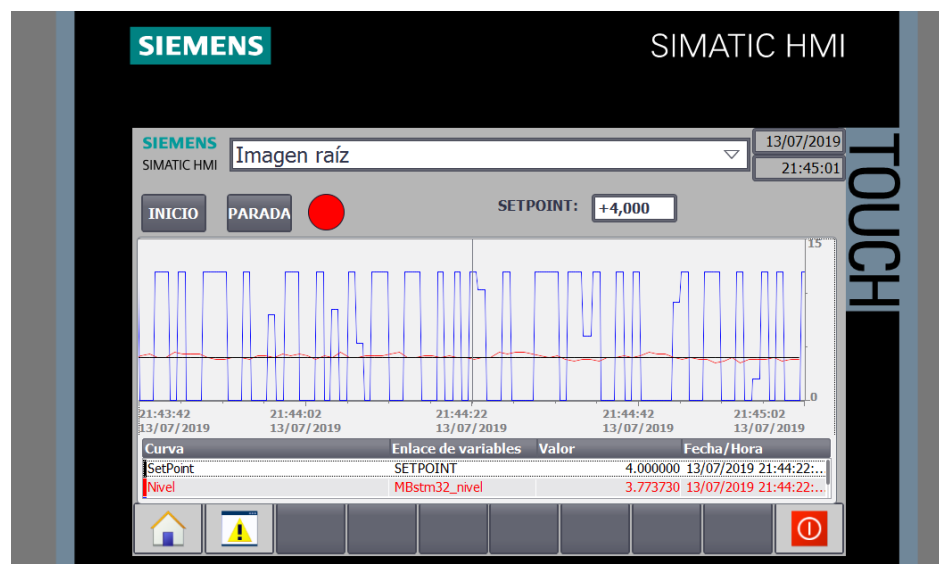
**Figura 71.** Controlador PID propio del PLC

Por consiguiente, se realizó una prueba en el controlador de Lógica Difusa y al momento de un cambio de consigna superior al valor anterior, la señal de control del controlador de Lógica Difusa subió al máximo el valor y bajó en una pendiente su señal de control como indica la **Figura 72**. En comparación al PID propio de Siemens se puede apreciar frecuencia de la señal de control reducida.



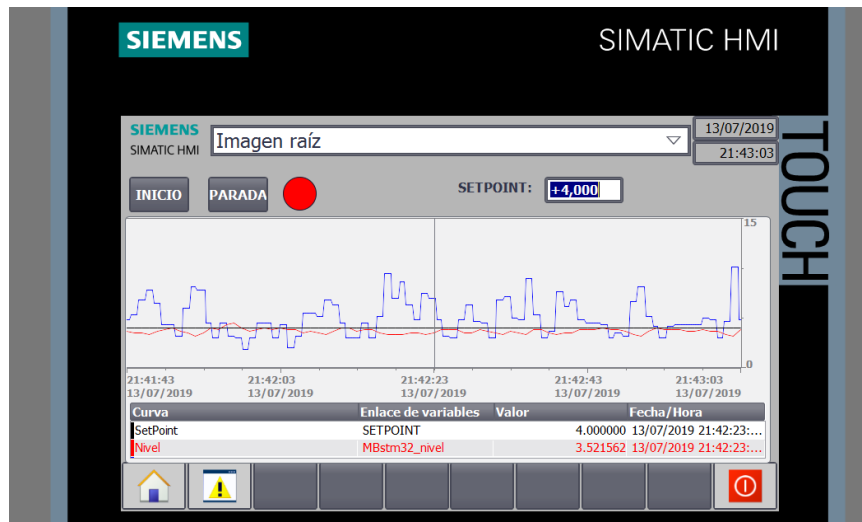
**Figura 72.** Prueba en el controlador de Lógica Difusa

La **Figura 73** muestra el comportamiento del controlador PID para la estabilización de la planta, se observa frecuencia alta y cambios de amplitud considerables.



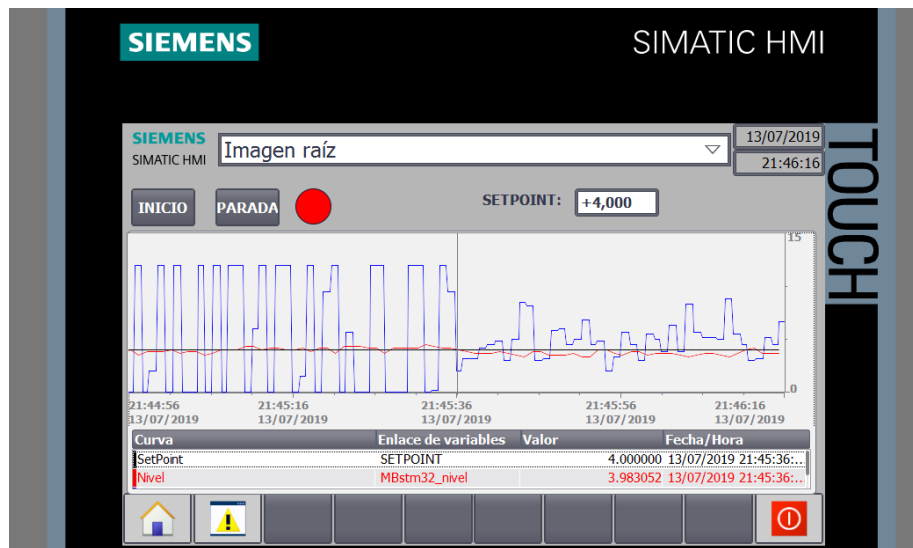
**Figura 73.** Comportamiento de la planta con PID

La **Figura 74** indica el comportamiento del controlador de Lógica Difusa, se observa una reducción de la frecuencia en su señal de control.



**Figura 74.** Comportamiento de la planta con Lógica Difusa

En la **Figura 75** se observa al lado izquierdo el comportamiento del PID del PLC controlando la planta, y luego se realizó el cambio de controlador a lógica difusa mediante programación del PLC. Se observa que no existen problemas al cambio de controlador de PID a Lógica Difusa.



**Figura 75.** Controlador PID vs Controlador de Lógica Difusa

La frecuencia de la señal de control del PID alcanza una frecuencia máxima de 0.45Hz (periodo de 2.22s) aproximadamente, mientras que la señal de control del controlador difuso alcanza una frecuencia máxima de 0.16Hz (periodo de 6s).

De igual manera el controlador alcanza una amplitud del 100% en sus cambios de estado para mantener la consigna, pareciéndose a una señal pulsante de amplitud modulada o PWM. Sin embargo, la señal de control del controlador difuso alcanza cambios aproximadamente del 50% de su amplitud máxima. Estos cambios de la señal de control se producen por las perturbaciones del sistema, que en el modelo son aleatorios y ambos controladores compensan el error enviando más señal de control para llegar a la consigna.

#### **4.5. Análisis e interpretación de resultados encuesta**

Se realizó un total de 32 encuestas aplicadas a los alumnos de octavo nivel de la carrera Ingeniería en Mecatrónica de la UFA ESPE-L. Antes de que los estudiantes realicen la encuesta fue necesario realizar una explicación, demostración y que manipulen las estaciones industriales los alumnos con el objetivo de obtener respuestas certeras para el análisis respectivo de las preguntas. La encuesta aplicada es la siguiente:

##### **1. ¿Qué tan difícil fue usar el módulo de E/S con las estaciones industriales simuladas?**

Difícil ( )      Normal ( )      Fácil ( )

##### **2. Califique su experiencia con las estaciones industriales simuladas y el módulo de E/S.**

Bastante útil ( )      Muy útil( )      Útil ( )      Poco útil( )      Nada útil ( )

**3. ¿Cuál es la calificación que debe tener el módulo de E/S junto con las estaciones industriales simuladas?**

Excelente ( )      Bueno ( )      Normal ( )      Malo ( )

**4. ¿Cree usted que este sistema es adecuado para implementar diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas?**

Si ( )                                  No ( )

**5. ¿Cree usted que este sistema le permita reforzar conocimientos en cuanto al diagrama escalera y sistemas de control?**

Si ( )                                  No ( )

**6. Escribir alguna recomendación.**

**Gracias por su colaboración**

#### **4.6.Resultados de la Encuesta**

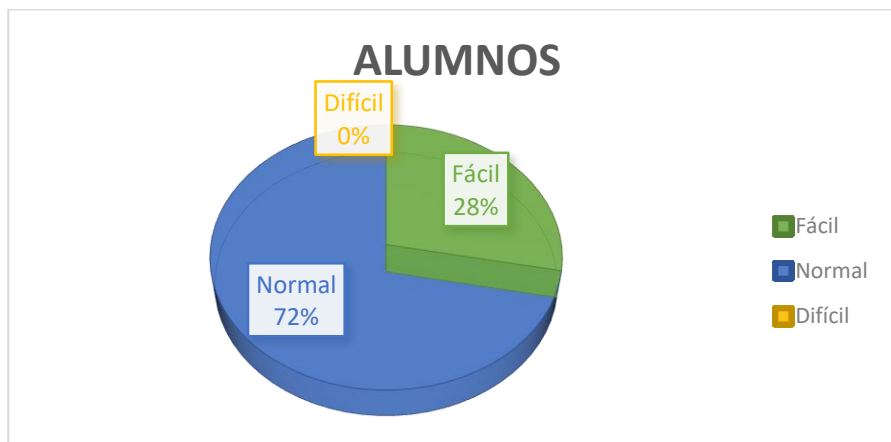
**Pregunta 1: ¿Qué tan difícil fue usar el módulo de E/S con las estaciones industriales simuladas?**

**Tabla 11**

Dificultad al usar el módulo de E/S

<b>Respuesta</b>	<b>Personas</b>
<b>Difícil</b>	0
<b>Normal</b>	23
<b>Fácil</b>	9





**Figura 76.** Dificultad del uso del módulo de E/S

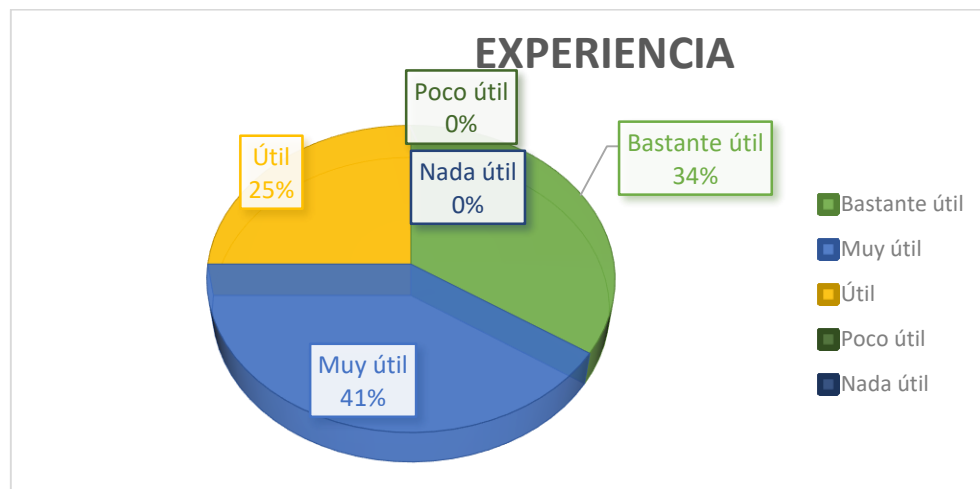
La **Figura 76** indica el nivel de dificultad considerado de los alumnos al uso del módulo de E/S, se obtuvo los valores en porcentaje de un 72% normal, un 28% fácil y un 0% difícil. Estos resultados muestran una gran aceptación por la facilidad de conectarse entre el módulo de E/S al PLC y la estación industrial y gozar de sus funcionalidades sin dificultades.

**Pregunta 2: Califique su experiencia con las estaciones industriales simuladas y el módulo de E/S.**

**Tabla 12**

*Experiencia de uso del módulo de E/S con las estaciones industriales*

Respuesta	Personas
Bastante útil	11
Muy útil	13
Útil	8
Poco útil	0
Nada útil	0



**Figura 77.** Experiencia de uso del módulo de E/S con las estaciones industriales

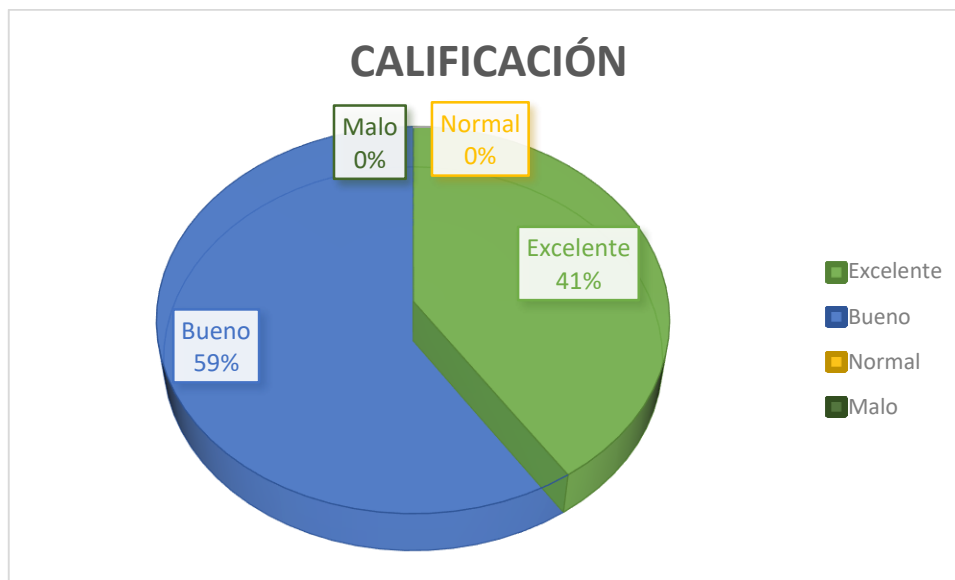
En la **Figura 77**, se observa que las estadísticas obtenidas por la encuesta respecto a esta pregunta son: un 41% muy útil, 34% bastante útil, 25% útil, 0% poco útil 0% nada útil, estos resultados indican que el interactuar con el uso del módulo de E/S junto con las estaciones industriales virtuales, es una experiencia útil de ya que es una alternativa para realizar más prácticas de laboratorio.

**Pregunta 3: ¿Cuál es la calificación que debe tener el módulo de E/S junto con las estaciones industriales simuladas?**

**Tabla 13**

*Calificación del módulo de E/S con las estaciones industriales*

Respuesta	Personas
Excelente	13
Bueno	19
Normal	0
Malo	0



**Figura 78.** Calificación del módulo de E/S con las estaciones industriales

La **Figura 78**, muestra los datos obtenidos de la tercera pregunta consiguiendo un resultado de: 59% bueno, 41% excelente, 0% normal y un 0% malo. Esta información muestra que el módulo de E/S junto con las estaciones industriales simuladas tiene una buena acogida por parte de los alumnos al ser didáctico desarrollando una mejor experiencia al utilizarlo.

**Pregunta 4 ¿Cree usted que este sistema es adecuado para implementar diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas?**

**Tabla 14**

*Implementar diagramas escalera y sistemas de control en estaciones*

Respuestas	Personas
Si	31
No	1



**Figura 79.** Implementar diagramas escalera y sistemas de control en las estaciones

En la **Figura 79** se observa la información obtenida de la pregunta 4 con los valores de: 100% si y un 0% no. Estos datos reflejan la evidente aceptación del módulo de E/S y las estaciones industriales simuladas por parte de los alumnos ya que comprobaron que se puede programar cualquier secuencia de diagrama escalera como si fuese una real sin dificultad en la estación industrial digital, además, se puede implementar sistemas de control como el PID y de lógica difusa en la estación industrial analógico.

**Pregunta 5: ¿Cree usted que este sistema le permita reforzar conocimientos en cuanto al diagrama escalera y sistemas de control?**

**Tabla 15**

*Refuerzo de conocimientos*

Respuesta	Personas
SI	30
NO	2



**Figura 80.** Refuerzo de conocimientos en diagrama de escalera y sistemas de control

En la **Figura 80**, se aprecia los resultados de la pregunta 5 enfocada a reforzar los conocimientos del uso del diagrama escalera y sistemas de control obteniendo un valor de: un 100% de los alumnos dijeron si y el 0% no. Con esta información se interpreta que sí, se refuerzan sus conocimientos, pues al existir varios alumnos y pocas estaciones para realizar prácticas no se realizan de una manera correcta, es por esto que el módulo de E/S y las estaciones industriales simuladas son importantes ya que al comportarse de manera similar que una real se puede realizar más prácticas y fortificar sus conocimientos.

**Pregunta 6: Escribir alguna recomendación.**

**Tabla 16**

*Recomendaciones del Proyecto*

**Sugerencias:**

---

Realizar un manual de usuario acerca del funcionamiento de las estaciones industriales

---

Mejorar un poco la interfaz

---

Agregar el número de entradas y salidas

---

Crear más estaciones industriales virtuales

---

En La **Tabla 16** se aprecia las recomendaciones más reiteradas por parte de los encuestados como: realizar un manual de usuario acerca del funcionamiento de las estaciones industriales, mejorara la interfaz para que sea un poco más amigable, en ek módulo de E/S agregar más entradas, salidas y por último crear más estaciones industriales para mayor variedad.

#### **4.7. Discusión de Resultados**

La información obtenida por medio de las encuestas a los alumnos, muestra datos propicios que va de acuerdo al proyecto. Es así que se obtiene una aprobación considerable por parte de los alumnos en el uso del módulo de E/S junto con las estaciones industriales virtuales, comprobando que ayuda a reforzar los conocimientos acerca del diagrama escalera y los sistemas de control en estaciones industriales. Además, a través de recomendaciones se puede mejorar el módulo de E/S junto con las estaciones industriales simuladas para una mejor experiencia al usarlo en prácticas del laboratorio.

#### **4.8. Validación de la hipótesis**

La hipótesis que se planteó en el proyecto de investigación es:

¿El diseño e implementación de un módulo de E/S con un ambiente virtual permite la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas?

Para validar la hipótesis se utilizará un método estadístico llamado Chi Cuadrado y se procede de la siguiente manera estableciendo una hipótesis nula y otra hipótesis alternativa.

- **Hipótesis nula (H<sub>0</sub>):** El diseño e implementación de un módulo de E/S con un ambiente virtual no permite la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas.
- **Hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>):** El diseño e implementación de un módulo de E/S con un ambiente virtual permite la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas.

Para calcular el valor del chi cuadrado se utiliza la Ec. 4, que según (San Martín, 2011).

$$\lambda^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

$\lambda^2$ : Chi cuadrado.

$O_i$ : Es la frecuencia absoluta observada o empírica.

$E_i$ : Es la frecuencia esperada.

Nivel de Confianza: 95%

En la **Tabla 17** muestra la prueba realizada con 32 repeticiones, esta prueba consiste en la implementación del diagrama escalera y sistemas de control en las estaciones industriales simuladas.

**Tabla 17***Pruebas realizadas*

N°	IMPLEMENTA REFUERZA	SI	NO	Cant. Pruebas
1	SI	30	0	30
2	NO	1	1	2
TOTAL		31	1	32

Para obtener las frecuencias esperadas de si las pruebas son funcionales es necesario recurrir al número de repeticiones realizadas, la sumatoria de las pruebas funcionales y el

**Ecuación 5**

$$\text{Freq. Esperada. Funcional} = \text{Repeticiones} * \frac{\sum \text{Funcional}}{\sum \# \text{Pruebas}}$$

$$\text{Freq. Esperada. SI} = 29.0625$$

número total de las pruebas realizadas como se muestra en la Ec 5.

Para la frecuencia del no funcional se usa la Ec 6, tomando en cuenta que hay que cambiar la sumatoria de funcionales con la de no funcionales.

**Ecuación 6**

$$\text{Freq. Esperada. NoFuncional} = \text{Repeticiones} * \frac{\sum \text{NoFuncional}}{\sum \# \text{Pruebas}}$$

$$\text{Freq. Esperada. NO} = 0.9375$$

La **Tabla 18**, muestra los datos de la frecuencia absoluta  $O_i$  y frecuencia esperada  $E_i$  con esta información se procede a realizar los cálculos.



**Tabla 18***Cálculo del Chi-cuadrado*

Condición de prueba	O	E	(O-E)	(O-E) <sup>2</sup>	(O-E) <sup>2</sup> /E
Implementa y refuerza	30	29.0625	0.9375	0.87890625	0.030241935
Implementa y no refuerza	1	29.0625	-28.0625	787.503906	27.0969086
No Implementa y si refuerza	0	0.9375	-0.9375	0.87890625	0.9375
No implementa y no refuerza	1	0.9375	0.0625	0.00390625	0.004166667
<b>TOTAL</b>					<b>28.0688172</b>

El siguiente paso es conocer los grados de libertad mediante la Ec 7.

$$(\# \text{ de pruebas} - 1) * (\# \text{ de opciones} - 1) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$(2 - 1) * (2 - 1) = 1$$

Con los grados de libertad calculados, se recurre a la **Figura 81** teniendo en cuenta que la columna de p con el valor de 0.05 es el valor del 95% de confianza correspondiente, mientras que en la fila g es el grado de libertad calculado, que en este caso es el valor de 1. La intersección de la fila g y columna p se obtiene el valor tabulado de 3.841, mientras que el valor calculado es 28.068; esto demuestra que el valor calculado es mayor que el tabulado rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa como válida con un grado de confianza del 95%. Es decir el diseño e implementación de un módulo de E/S con un ambiente virtual si permite la implementación de diagrama escalera y sistemas de control en estaciones industriales simuladas, además de reforzar sus conocimientos..

	0,001	0,005	0,01	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05
<b>g.d.l</b>								
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5,024	4,709	4,218	<b>3,841</b>
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7,378	7,013	6,438	5,991
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9,348	8,947	8,311	7,815
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11,143	10,712	10,026	9,488
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12,833	12,375	11,644	11,070
6	22,458	18,548	16,812	15,033	14,449	13,968	13,198	12,592
7	24,322	20,278	18,475	16,622	16,013	15,509	14,703	14,067
8	26,124	21,955	20,090	18,168	17,535	17,010	16,171	15,507
9	27,877	23,589	21,666	19,679	19,023	18,480	17,608	16,919
10	29,588	25,188	23,209	21,161	20,483	19,922	19,021	18,307

**Figura 81.** Tabla de la distribución del Chi-cuadrado

Fuente: (UNIVERSIDAD DE ATACAMA, 2010)

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- El diseño del módulo de E/S en conjunto con el ambiente virtual en Unity y los modelos matemáticos de MatLab/Simulink permiten recrear un proceso industrial para que el usuario pueda crear diferentes tipos de controladores y concluir que controlador es el más adecuado para la aplicación, además de configurar una red industrial Modbus TCP.
- El módulo de E/S y el ambiente virtual de Unity permite una interacción entre los sensores y actuadores virtuales y un controlador PLC, con lo cual el usuario puede crear diferentes rutinas de funcionamiento mediante diagrama escalera y poder visualizar y corregir errores.
- El módulo creado permite a docentes y estudiantes incrementar prácticas de laboratorio, con el fin de sintetizar conocimientos sobre neumática, sistemas de control clásico, sistemas de control moderno, redes neuronales, PLC, redes industriales, automatización, instrumentación.
- La herramienta de sintonización PID de Siemens es de gran ayuda, proporcionándonos un controlador PID preciso, aunque no toma en cuenta régimen de operación de los equipos asociados a la planta.
- El diseño de un controlador de Lógica Difusa puede ser la solución a problemas de control en los que se desea controlar además de la variable del proceso el régimen de operación de los equipos asociados al proceso a controlar

- Para el caso planteado en esta tesis del control de nivel de un tanque, el controlador de Lógica Difusa tuvo una mejor respuesta de control tanto en cambios del valor de consigna tanto superiores e inferiores a su valor anterior, en comparación al PID. Aunque ambos controladores llegaron al valor de consigna, el PID al tener cambios bruscos de amplitud y alta frecuencia en su señal de control no es recomendado para el problema planteado ya que la señal de control va a una válvula por desgaste mecánico además de una pérdida de la calibración. Sin embargo, el controlador de Lógica Difusa tiene una frecuencia muy reducida y sus cambios de amplitud siguen un patrón, por lo que es superior al PID para el problema de control planteado en esta tesis.
- El diseño de controladores difusos requiere un profundo conocimiento de la planta, parámetros de operación de los equipos, rango de operación de la variable manipulada, magnitud máxima del error, entre otros parámetros son de vital importancia al momento del diseño de funciones de membresía, conjuntos difusos y reglas.

## **5.2. Recomendaciones**

- Los entornos virtuales y el modelo matemático del entorno deben ser ejecutados por computadores de tecnología moderna para un funcionamiento sin problemas.
- Es conveniente considerar la compra de la licencia del TIA PORTAL V14 ya que permite utilizar más funciones y opciones para configuraciones de redes industriales utilizando CP-Lean en el PLC S7 300.

- Para implementar más entradas, salidas digitales y analógicas se necesita el chip MCP23017 para digitales y MCP4822 analógicas con su respectivo amplificador operacional TL082.
- Si al módulo de E/S se implementan más entradas y salidas ya sean analógicas o digitales implica que el tamaño del módulo aumente considerablemente.
- Para mayor facilidad al mostrar las gráficas de control de la planta es conveniente usar el HMI SIMATIC del PLC S7 300, ya que si se agrega en el entorno será más exigente las características tecnológicas del computador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andaluz, V., Castillo, D., Miranda, R., & Alulema, J. (2017). Realidad virtual aplicada a procesos industriales. *Springer Link*. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5_5)
- Andaluz, V., Castillo, D., Miranda, R., & Aulema, J. (2017). Virtual Reality Applied to Industrial Processes. *Springer International*. Recuperado el 30 de Julio de 2018, de [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5_5)
- Andaluz, V., Sánchez, J., Chamba, J., & Romero, P. (2016). Animación virtual Unity3D de robots con mecanismo acoplado y desacoplado. *Springer Link*. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3_6)
- AUTODESK. (2019). *AUTODESK*. Recuperado el 15 de Agosto de 2018, de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-plant-3d>
- BBVA INNOVATION CENTER. (2015). Realidad Virtual. *SERIE INNOVATION TRENDS*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018
- Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controllers*. Burlington: Elsevier Newnes. Recuperado el 4 de Noviembre de 2018
- Cabra Reyes, C. A. (2014). *Universidad Militar Nueva Granada*. Recuperado el 30 de Julio de 2019, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12801/Realidad%20Virtual%20un%20Paso%20m%C3%A1s%20all%C3%A1%20en%20la%20Educaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cardozo, H. J. (2004). *JeuAzarru*. Recuperado el 15 de Agosto de 2018, de <http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/RealidadVirtual.pdf>
- Chakraborty, S., & Waghmare, C. (2016). Hardware in Loop Simulation for Aircraft Arrestor Gear System.
- CM LABS. (2019). *CM LABS*. Recuperado el 24 de Junio de 2019, de <https://www.cm-labs.com/immersive-simulation-products/construction-equipment-training-simulators/>
- Croft, P. (Enero de 2018). Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de [https://as.com/meristation/2018/01/10/reportajes/1515567480\\_172151.html](https://as.com/meristation/2018/01/10/reportajes/1515567480_172151.html)
- De Jong, E., de Graaff, R., & Vaessen, P. (2011). European White Book on Real-Time Powerhardware-in-the-Loop testing. *DERlab*.
- HOME SWEET 3D. (2018). Recuperado el 23 de Septiembre de 2018, de <http://www.sweethome3d.com/es/userGuide.jsp>
- Jack, H. (2007). *Automating Manufacturing Systems*.
- Khademi, M., Hondori, H., Dodakian, L., Crammer, S., & Lopes, C. (2013). Comparing "pick and place" task in spatial Augmented Reality versus non-immersive Virtual Reality for rehabilitation setting. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.
- Kozhevnikov, M., & Gurlitt, J. (2013). Immersive and Non-immersive Virtual Reality System to Learn Relative Motion Concepts. *IEEE XPLORE*.
- Matlab. (2019). Recuperado el 22 de Mayo de 2019, de <https://la.mathworks.com/solutions/embedded-systems.html>
- McLellan, H. (1993). *Virtual Reality*. Washington, D.C: ERIC Clearinghouse.

Mónica Inés Fernández. (2014). *Realidades virtuales aumentadas para el desarrollo social*.

Buenos Aires: ALFA-GAVIOTA. Recuperado el 5 de Agosto de 2018

Montanari, A., Luciano, C., Stopa, M., & Lima, C. (2017). A Virtual Environment for

Paralleling Process of Synchronus Generators on LabVIEW and Simulink. *IEEE*

*Xplore*.

OCULUS. (2019). *OCULUS*. Recuperado el 24 de Junio de 2019, de

<https://www.oculus.com/rift-s/features/>

REDBIRD. (2019). *REDBIRD SIMULATOR*. Recuperado el 26 de Junio de 2019, de

<https://simulators.redbirdflight.com/products/fmx>

Rivera, J. (28 de Febrero de 2018). Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de

<https://www.tudosisdigital.com/noticias/realidad-virtual-que-es-y-que-tipos-existen>

Roscoe, A., Guillo-Sansano, E., & Burt, G. (2016). *Physical Hardare-in-the-Loop*

*Modeling and Simulation*. Glasgow: Smart Grid Handbook.

SHARP. (Julio de 2002). *Farnell*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de

<https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf?fbclid=IwAR32cy6arQArhaL5aFoJclu2rxSc6kHjm1ociqxJ5uVITbGZIKEG-dAufUM>

SIEMENS. (2019). Recuperado el 5 de Mayo de 2019, de

<https://w5.siemens.com/cms/mam/industry/automatizacion/simatic-sistemas-de-automatizacion-industrial/plc/pages/plc-siemens-simatic.aspx>

Unity 3D. (8 de Mayo de 2019). Obtenido de [https://unity.com/es/solutions/ar-and-vr-](https://unity.com/es/solutions/ar-and-vr-games)

[games](https://unity.com/es/solutions/ar-and-vr-games)

UNIVERSIDAD DE ATACAMA. (2010). Recuperado el 24 de Junio de 2019, de

<http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2010/eyp2/Tabla%20Chi-Cuadrado.pdf>



Universidad Nacional de Educación a Distancia. (2015). *Controladores Industriales*

*Inteligentes*. Recuperado el 12 de Febrero de 2019, de

[http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE6\\_1\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf)

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. (2012). Recuperado el 20 de Junio de 2019,

de

[http://www.est.uc3m.es/esp/nueva\\_docencia/getafe/ciencias\\_estadisticas/TecnicasReferenciaEstadistica/tablachicuadrado.pdf](http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/getafe/ciencias_estadisticas/TecnicasReferenciaEstadistica/tablachicuadrado.pdf)

VIVE Enterprise. (2019). *VIVE Enterprise*. Recuperado el 24 de Junio de 2019, de

<https://enterprise.vive.com/us/product/vive-pro-eye/>

Waeltermann, P. (2016). Hardware-in-the-Loop: The technology for testing Electronic

Controls in Vehicle Engineering. *dSPACE*.

Wolfgang Broll, R., & Bernhard Jung, P. (2013). *Virtual und Augmented*. Berlín: Springer

vieweg.

# ANEXOS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **BARBERÁN MUÑOZ JUAN CARLOS, ILLESCAS FIERRO FRANCISCO XAVIER**

En la ciudad de Latacunga, a los 18 días del mes de julio del 2019.

**Aprobado por:**

Ing. Gordón Garcés Andrés Marcelo

**DIRECTOR DEL PROYECTO**



Ing. Darío Mendoza Chupantasi

**DIRECTOR DE CARRERA**

Dr. Rodrigo Vaca Corrales

**SECRETARIO ACADÉMICO**

