



**Diseño e Implementación de un protocolo de comunicación industrial de bajo costo en la  
Planta de Nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas  
Armadas ESPE Sede Latacunga.**

Cueva Mogro, Leonardo Daniel y Pérez Yáñez, Christian Xavier

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería en Electromecánica

Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio M.Sc

10 de febrero del 2023

Latacunga

## Reporte de verificación de contenido



---

**INFORME DE ORIGINALIDAD**

---

**7** %  
INDICE DE SIMILITUD

**7** %  
FUENTES DE INTERNET

**1** %  
PUBLICACIONES

**4** %  
TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE



Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio M.Sc

C.C.: 1802565711



**Departamento de Eléctrica y Electrónica**

**Carrera de Ingeniería Electromecánica**

**Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño e Implementación de un protocolo de comunicación industrial de bajo costo en la Planta de Nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga”** fue realizado por los señores **Cueva Mogro, Leonardo Daniel y Pérez Yáñez, Christian Xavier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 09 de febrero del 2023

Firma:



**Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio M.SC**

C. C.1802565711



Departamento de Eléctrica y Electrónica  
Carrera de Ingeniería Electromecánica

#### Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cueva Mogro, Leonardo Daniel** y **Pérez Yánez, Christian Xavier**, con cédulas de ciudadanía n°1725153454 y n°1722433081, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño e Implementación de un protocolo de comunicación industrial de bajo costo en la Planta de Nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 09 de febrero del 2023

Firma

.....  
**Cueva Mogro, Leonardo Daniel**

C.C.: 1725153454

.....  
**Pérez Yánez, Christian Xavier**

C.C.: 1722433081



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**Autorización de Publicación**

Nosotros **Cueva Mogro, Leonardo Daniel y Pérez Yáñez, Christian Xavier**, con cédulas de ciudadanía n°1725153454 y n°1722433081, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Diseño e Implementación de un protocolo de comunicación industrial de bajo costo en la Planta de Nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 09 de febrero del 2023

Firma

Cueva Mogro, Leonardo Daniel

C.C.: 1725153454

Pérez Yáñez, Christian Xavier

C.C.: 1722433081

## Dedicatoria

Quiero dedicarle a mi padre y madre este trabajo ya que siempre estuvieron prestos ayudarme sin importar que ellos atravesaran momentos difíciles

Cueva Mogro, Leonardo Daniel

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres que me apoyaron y contuvieron los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento. También, quiero dedicarle este trabajo a mi hijo Benjamín. Su nacimiento, ya sea por casualidad o causalidad, ha coincidido con la finalización de esta tesis. Sin duda él es lo mejor que me ha pasado, y ha llegado en el momento justo para darme el último empujón que me faltaba para culminar esta etapa.

Christian Xavier, Pérez Yáñez

## Agradecimiento

Agradezco a cada uno de mis familiares por estar apoyándome en cada momento, dándome la mano en cada momento difícil de mi vida.

Cueva Mogro, Leonardo Daniel

A dios por darme la oportunidad de crecer profesionalmente. A mi familia agradecer por darme la educación, un hogar donde crecer desarrollarme, equivocarme y aprender de la vida. Agradezco a mi hijo Benjamín por haber llegado a mi vida y darme esa razón para poder salir adelante. A mis amigos Francisco y José por acompañarme en toda esta etapa de mi vida ellos fueron quienes no me dejaron decaer.

Christian Xavier, Pérez Yáñez

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría .....	4
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos .....	8
Índice de figuras .....	11
Índice de tablas.....	14
Resumen.....	15
Abstract .....	16
Capítulo I:Problema .....	17
Introducción.....	17
Antecedente de la investigación.....	18
Planteamiento del problema .....	19
Justificación e importancia .....	20
Proyectos relacionados.....	20
Objetivos .....	21
<i>Objetivo general</i> .....	21
<i>Objetivos específicos</i> .....	21
Metas .....	22
Variables de la investigación .....	22
<i>Variable independiente</i> .....	22

<i>Variable dependiente</i> .....	23
Hipótesis .....	23
<b>Capítulo II: Marco Teórico.....</b>	<b>24</b>
La pirámide de automatización.....	24
Control de nivel de fluidos .....	26
Sistemas de Control.....	27
<i>Control PID</i> .....	28
Sensor .....	30
<i>Sensor de nivel</i> .....	30
Tarjeta de desarrollo .....	35
Raspberry Pi 4 Model B .....	36
Buses de Campo .....	37
<i>Ventajas de un bus de campo</i> .....	38
<i>Tipos de Buses de Campo</i> .....	40
<b>Capitulo III: Metodología .....</b>	<b>43</b>
Modalidad de la investigación .....	43
<i>Método bibliográfico documental</i> .....	43
<i>Método experimental</i> .....	43
Tipos de investigación.....	43
Diseño de la investigación .....	44
<i>Investigación bibliográfica</i> .....	44
<i>Selección del sensor y bus de campo</i> .....	44
<i>Implementación</i> .....	45
<i>Comprobación</i> .....	45
<i>Validación</i> .....	45
<i>Evaluación</i> .....	45

Técnicas de recolección de datos .....	45
<b>Capítulo IV: Propuesta de diseño.....</b>	<b>47</b>
Condiciones físicas de la planta de nivel .....	47
Selección del sensor de nivel .....	50
Selección del bus de campo .....	53
Selección del dispositivo modbus .....	55
Protocolo de comunicación Modbus RTU .....	57
Diseño de la interfaz gráfica HMI .....	58
<b>Capítulo V: Análisis de Resultados.....</b>	<b>61</b>
Comprobación del envío de datos del sensor de nivel .....	61
Validación en la planta de nivel .....	67
<i>Pruebas con el controlador PID .....</i>	<i>67</i>
<i>Pruebas con el controlador Fuzzy I .....</i>	<i>76</i>
<i>Pruebas con el controlador Fuzzy II .....</i>	<i>84</i>
Evaluación de la planta.....	92
<b>Conclusiones .....</b>	<b>97</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>99</b>
<b>Trabajos Futuros.....</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>101</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>104</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Pirámide de Automatización .....	25
<b>Figura 2</b> Representación de un sistema de control.....	28
<b>Figura 3</b> Diagrama de bloques del sistema SISO .....	29
<b>Figura 4</b> Interruptor de nivel magnético de flotador .....	32
<b>Figura 5</b> Sensor ultrasónico sin contacto .....	33
<b>Figura 6</b> Sensor ultrasónico de contacto.....	34
<b>Figura 7</b> Sensor de nivel por presión .....	34
<b>Figura 8</b> Sensor de nivel capacitivo .....	35
<b>Figura 9</b> Raspberry Pi4 Modelo B .....	37
<b>Figura 10</b> Representación de un bus de campo .....	38
<b>Figura 11</b> Arquitectura de un bus de campo .....	39
<b>Figura 12</b> Metodología del proyecto de investigación.....	44
<b>Figura 13</b> Fuentes de alimentación existentes en la planta de nivel.....	48
<b>Figura 14</b> Lógica de control de nivel .....	49
<b>Figura 15</b> Selección de dispositivos para el bus de campo .....	57
<b>Figura 16</b> Protocolo de comunicación modbus RTU.....	58
<b>Figura 17</b> Pantalla de inicio.....	58
<b>Figura 18</b> Interfaz HMI .....	59
<b>Figura 19</b> Tendencia de datos .....	60
<b>Figura 20</b> Valores de nivel exactos y medidos el sensor EAMPPT-136 .....	62
<b>Figura 21</b> Errores de medición en el sensor EAMPPT-136 .....	63
<b>Figura 22</b> Módulo sensor .....	64
<b>Figura 23</b> Valores de nivel del tanque con el módulo sensor propuesto .....	66
<b>Figura 24</b> Respuesta con el controlador PID y sensor anterior .....	70

<b>Figura 25</b> Respuesta con el controlador PID y sensor actual .....	71
<b>Figura 26</b> Respuesta con el controlador PID .....	71
<b>Figura 27</b> Respuesta con PID de 0 a 120 s .....	72
<b>Figura 28</b> Respuesta con PID de 120 a 210 s .....	73
<b>Figura 29</b> Respuesta con PID de 210 a 300 s .....	73
<b>Figura 30</b> Respuesta con PID de 300 a 390 s .....	74
<b>Figura 31</b> Respuesta con PID de 390 a 480 s .....	75
<b>Figura 32</b> Respuesta con PID de 480 a 570 s .....	75
<b>Figura 33</b> Respuesta con el controlador Fuzzy I y sensor anterior .....	78
<b>Figura 34</b> Respuesta con el controlador Fuzzy I y sensor actual .....	79
<b>Figura 35</b> Respuesta con el controlador Fuzzy I.....	79
<b>Figura 36</b> Respuesta con Fuzzy I de 0 a 120 s.....	80
<b>Figura 37</b> Respuesta con Fuzzy I de 120 a 210 s.....	81
<b>Figura 38</b> Respuesta con Fuzzy I de 210 a 300 s.....	81
<b>Figura 39</b> Respuesta con Fuzzy I de 300 a 390 s.....	82
<b>Figura 40</b> Respuesta con Fuzzy I de 390 a 480 s.....	83
<b>Figura 41</b> Respuesta con Fuzzy I de 480 a 570 s.....	83
<b>Figura 42</b> Respuesta con el controlador Fuzzy II y sensor anterior .....	86
<b>Figura 43</b> Respuesta con el controlador Fuzzy II y sensor actual .....	87
<b>Figura 44</b> Respuesta con el controlador Fuzzy II.....	87
<b>Figura 45</b> Respuesta con Fuzzy II de 0 a 120 s.....	88
<b>Figura 46</b> Respuesta con Fuzzy II de 120 a 210 s.....	89
<b>Figura 47</b> Respuesta con Fuzzy II de 210 a 300 s.....	89
<b>Figura 48</b> Respuesta con Fuzzy II de 300 a 390 s.....	90
<b>Figura 49</b> Respuesta con Fuzzy II de 390 a 480 s.....	91
<b>Figura 50</b> Respuesta con Fuzzy II de 480 a 570 s.....	91

<b>Figura 51</b> Resultados del sistema con PID .....	93
<b>Figura 52</b> Resultados del sistema con Fuzzy I .....	94
<b>Figura 53</b> Resultados del sistema con Fuzzy II .....	94
<b>Figura 54</b> Pruebas de la planta con perturbaciones .....	96

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> Características de los sensores de nivel .....	52
<b>Tabla 2</b> Características de los buses de campo.....	54
<b>Tabla 3</b> Características de los dispositivos modbus.....	56
<b>Tabla 4</b> Mediciones de la altura del tanque con el sensor EAMPPT1-136.....	62
<b>Tabla 5</b> Mediciones AD de la altura del tanque con el módulo sensor.....	65
<b>Tabla 6</b> Tolerancia permitida de nivel del tanque .....	67
<b>Tabla 7</b> Error Ess y tiempo Ts bajo la operación del controlador PID .....	68
<b>Tabla 8</b> Datos PV con el controlador PID .....	69
<b>Tabla 9</b> Error Ess y tiempo Ts bajo la operación del controlador Fuzzy I .....	76
<b>Tabla 10</b> Datos PV con el controlador Fuzzy I .....	77
<b>Tabla 11</b> Error Ess y tiempo Ts bajo la operación del controlador Fuzzy II .....	84
<b>Tabla 12</b> Datos PV con el controlador Fuzzy II .....	85

## Resumen

El presente proyecto busca realizar la implementación de un protocolo de comunicación industrial a bajo costo por medio de un módulo acoplador de bus de campo con el fin de mejorar la comunicación a nivel de la planta de nivel y así obtener una mejor eficiencia a menores costos. Para iniciar se realizará una investigación bibliográfica sobre los módulos de comunicación que se encuentran disponibles en el mercado con el fin de escoger el que mejor satisfaga las necesidades. Posteriormente, se realizará el diseño de dicho protocolo establecido anteriormente en la investigación. Luego, se implementará el bus de campo en la planta de nivel para finalmente realizar las pruebas correspondientes para su verificación y validación a través de la experimentación correspondiente. Una implementación adicional es la búsqueda, diseño e implementación de un nuevo sensor con mejores características que permitirá la implementación del protocolo de comunicación de bajo costo en la planta de nivel con el fin de realizar las pruebas necesarias para validar el correcto funcionamiento de la planta. Finalmente, se comparará el funcionamiento del nuevo protocolo de comunicación industrial con respecto a su anterior comunicación que llevan a cabo las mismas experimentaciones, las cuales permite validar los resultados obtenidos con el nuevo protocolo.

*Palabras clave:* protocolo de comunicación, planta de nivel, protocolo de comunicación abierta (modbus), sensor de nivel

**Abstract**

This project seeks to implement a low-cost industrial communication protocol using a Fieldbus coupler module to improve communication at the plant level and thus obtain better efficiency at lower costs. To start, bibliographical research will be carried out on the communication modules that are available in the market to choose the one that best meets the needs. Subsequently, the design of said protocol established previously in the investigation will be carried out. Then, the field bus will be implemented in the level plant to finally carry out the corresponding tests for verification and validation through the corresponding experimentation. An additional implementation is the search, design, and implementation of a new sensor with better characteristics that will allow the implementation of the low-cost communication protocol at the level plant to carry out the necessary tests to validate the correct operation of the plant. Finally, the operation of the new industrial communication protocol will be compared with its previous communication, carrying out the same experiments, which will allow us to validate that the results obtained with the new protocol are more efficient than its predecessor.

*Key words:* communication protocol, level plant, open communication protocol (modbus), level sensor

## Capítulo I

### Problema

En el presente Apartado se detalla una breve introducción sobre los sistemas de comunicación y otros aspectos relacionados a los antecedentes y variables de la investigación, planteamiento del problema, objetivos generales y específicos, justificación e importancia, proyectos relacionados y metas a cumplir.

### Introducción

Desde el origen de la humanidad ha sido una necesidad el establecer una comunicación del ser humano, animales y todo el medio, iniciando con gestos faciales y signos con las manos, a fin de pasar información respecto a cualquier cosa de una persona a otra, especialmente informar sobre temas de interés entre los individuos, pero la comunicación generó una necesidad de registrarlo y la humanidad desarrolló métodos para plasmar gráficamente lo que comunicaban, tallando inicialmente artilugios en piedra, dando origen a la escritura; estos actos han sido llamados el mejor invento que ha tenido la humanidad hasta el momento, el lenguaje y la escritura (Williams, 1992). Hoy en día la necesidad de la información ha ido en mejoras continuas e implementadas a nivel industrial para comunicarse con el entorno de las máquinas y procesar los datos con el fin de pasar esa información a las personas, logrando una buena toma de decisiones. Los sistemas de comunicación que se aplican a nivel industrial son considerados un mecanismo de información de transmisión de datos entre diferentes capas de comunicación y componentes que llevan a cabo tareas de control y ejecución de procesos, esta comunicación se conoce como *protocolo* y se entiende como el conjunto de reglas que permite el intercambio de información entre dispositivos de una red industrial como enviar las magnitudes de un transductor a un procesador para que las analice y luego dependiendo de estas active ciertos actuadores para cumplir una tarea específica, en otras palabras un protocolo de comunicación industrial se define como el

lenguaje usado para la comunicación entre dispositivos y actualmente existen diversos lenguajes a nivel industrial en los que se destacan los protocolos P-Net, WorldFIP, HART, Modbus, Interbus, AS-I, PROFIBUS, entre otros (Hurtado Torres, 2020).

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga cuenta con una planta de nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos que fue desarrollada para el estudio comparativo entre controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo) y controladores inteligentes, esta planta cuenta con una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 4 B programada en CODESYS V3.5 SP16, para adquirir los datos del nivel del tanque cuenta con un sensor ultrasónico HRXL MAXSONAR WRM 7369-MB7369M que envía una señal en forma de voltaje analógico (0 a 5 Vdc) hacia a un circuito de acondicionamiento de señal y este a su vez a una tarjeta de adquisición de datos (MyDAQ) para conectar a la Raspberry Pi (Cuadrado Comina & Gonzalez Bravo, 2022).

### **Antecedentes de la investigación**

Las plantas de nivel tienen una gran importancia dentro de la industria, ya que mantiene el fluido dentro del rango establecido con la finalidad de realizar procesos con mayor eficiencia y protegerlo de posibles accidentes. Si el nivel en el depósito es muy bajo las tuberías se llenarían de aire y en caso de excederse el líquido se derramaría, lo que produciría desperdicios (Chavez, 2015). Sus múltiples aplicaciones en la industria como la alimenticia, química, petrolera, entre otros, hacen importante el estudio de estas.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga cuenta con una planta de nivel cuya implementación se lo realizó por estudiantes de la Carrera de Electromecánica en su proyecto de tesis, en donde la comunicación de los dispositivos es básica y no cuenta con ningún tipo de protocolo que permita enviar y recibir datos de forma eficiente y sin pérdidas, de igual manera la transferencia de información es lenta generándose un rendimiento menor (Garcés Pico & León Calderón, 2015; Cuadrado Comina & Gonzalez Bravo, 2022).

La modernización en las nuevas industrias encamina a la implementación de estrategias de comunicación que ayuden con la transmisión y disminución del tiempo en la recepción de datos. (Zambrano & Caballero, 2018). Es por ello que nace la necesidad de la implementación de un protocolo de comunicación de tipo Industrial como por ejemplo Modbus RTU, Modbus TCP/IP, Profinet, Profibus, entre otros que se emplean en una automatización (Sanchez, 2021; Mariño, 2012).

### **Planteamiento del problema**

Hoy en día, alrededor de todo el planeta se están efectuando grandes transformaciones tecnológicas y las comunicaciones se han convertido en el oxígeno de las instalaciones industriales. Por ello, uno de los problemas más importantes con los que se encuentran las empresas en el sector industrial a nivel global es la comunicación que debe ser fiable, rápida y segura en grandes extensiones como es el caso de las plantas industriales a gran escala.

Esto ha llevado que los conocimientos adquiridos en la Universidad sean fundamentalmente teóricos y, por tanto, generan una inexperiencia en cuanto al ámbito experimental en lo que respecta a protocolos de comunicación industrial, lo cual ha causado que profesionales de la universidad salgan con pocos conocimientos del funcionamiento de diversos buses de campo industriales.

Dentro del perfil de un Ing. Electromecánico se encuentra el uso racional de la energía, ingeniería de automatización y control en procesos industriales. Por lo que al implementar un protocolo de comunicación de tipo industrial por medio de buses de campo en la Planta de Nivel que se tiene en el laboratorio, se pretende mejorar la comunicación, además de una reducción en el tiempo de transmisión de datos, entre otras ventajas donde comunicación sea fiable y uniforme, validando de esta manera la experimentación en la planta como han realizado en la anterior tesis.

### **Justificación e importancia**

Las grandes compañías mundiales como Coca Cola, Nestlé, Pepsi y a nivel nacional Yanbal y Corporación Favorita cuya producción se realiza a gran escala, manteniendo rangos en el nivel de sus fluidos constantemente, por lo tanto, las plantas son automatizadas con el fin de mejorar el tiempo de producción, pero la mayoría cuentan con la desventaja de tener protocolos de comunicación antiguos que provoca la pérdida de la comunicación entre los dispositivos, por lo que gracias a las nuevas tecnologías se han creado protocolos de comunicación de tipo industrial a bajo costo que evita estos problemas. El proyecto de tesis busca mejorar la comunicación en la planta de nivel mediante la implementación de un protocolo de comunicación industrial por medio de un módulo de bus de campo a bajo costo, el cual aportará y complementará los conocimientos tanto teóricos como prácticos de los futuros estudiantes a través de nuevas tecnologías en el área industrial y aportará en mejorar la educación de los futuros profesionales.

### **Proyectos relacionados**

- **Título:** “Estudio de los protocolos y buses de campo para el control de procesos neumáticos en la industria productora cartonera de la ciudad de Duran”.  
**Autor.** Guillén Vélez, Josué Andrés  
**Universidad.** Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.  
**Año:** 2019
- **Título:** “Implementación de una comunicación Profibus DP entre el PLC S7-300 y una periferia descentralizada para el control de salidas digitales”.  
**Autor.** Raza Millingalli, Klever Israel  
**Universidad.** Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
**Año:** 2021

- **Título:** “Diseño e Implementación de una red Modbus/RTU entre dos autómatas programables S7-1200 basados en el estándar RS485”.

**Autores:**

- Zambrano Monserrate, Rene Eduardo
- Caballero de la Torre, Christian Patricio

**Universidad.** Universidad Politécnica Salesiana

**Año:** 2018

- **Título:** “Diseño de un sistema de seguridad instrumentado e integración a un módulo DCS mediante Modbus TCP/IP y Profinet”.

**Autor.** Soto Cervantes Antonio Francisco

**Universidad.** Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

**Año:** 2020

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar e Implementar un protocolo de comunicación industrial de bajo costo en la Planta de Nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

### ***Objetivos específicos***

- Realizar una investigación bibliográfica de los diferentes protocolos de comunicación industrial.
- Diseñar un protocolo de comunicación compatible con la planta.
- Seleccionar el protocolo de comunicación industrial que más se adapte a la planta de nivel.
- Adquirir un módulo de comunicación a bajo costo y un sensor de nivel de mejores características que permita mejorar la comunicación industrial.

- Implementar el protocolo de comunicación.
- Verificar el funcionamiento de la Planta de Nivel con el nuevo protocolo de comunicación.
- Validar el funcionamiento a través de las mismas experimentaciones previamente realizadas en la tesis anterior.

### **Metas**

Para el avance del presente proyecto se consideran las siguientes metas:

- Búsqueda por medio de una investigación bibliográfica sobre los diferentes protocolos de comunicación industrial. Periodo de ejecución 4 semanas.
- Diseño de un protocolo de comunicación compatible con la planta. Periodo de ejecución 4 semanas.
- Selección del protocolo de comunicación industrial que más se adapte a la planta de nivel. Periodo de ejecución 4 semanas.
- Adquisición de un módulo de comunicación a bajo costo y un sensor de nivel de mejores características que permita mejorar la comunicación industrial. Periodo de ejecución 5 semanas.
- Implementación del protocolo de comunicación industrial. Duración 6 semanas.
- Verificación del funcionamiento de la Planta de Nivel con el nuevo protocolo de comunicación. Periodo de ejecución 5 semanas
- Validación del funcionamiento a través de las mismas experimentaciones previamente realizadas en la tesis anterior. Periodo de ejecución 4 semanas.

### **Variables de la investigación**

#### ***Variable independiente***

Protocolo de comunicación industrial.

***Variable dependiente***

Eficiencia de la Planta de Nivel.

**Hipótesis**

La implementación de un protocolo de comunicación industrial a bajo costo por medio de módulos acopladores mejorará la eficiencia de la Planta de Nivel aplicando las mismas experimentaciones realizadas en la tesis anterior.

## Capítulo II

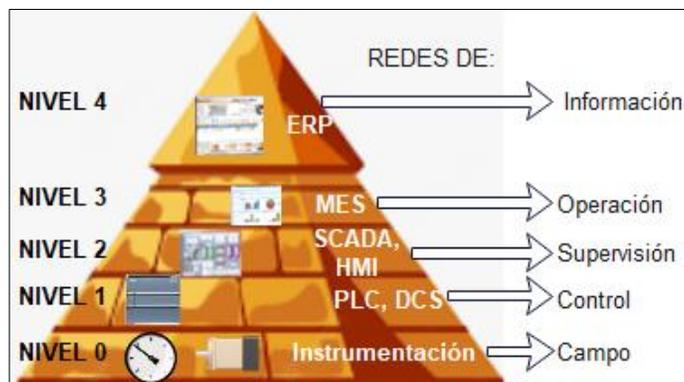
### Marco Teórico

En esta sección se realiza una descripción sobre la pirámide de automatización, control de nivel de fluidos, sistemas de control, sensores de nivel, tarjetas de desarrollo como la Raspberry Pi y detalle de los buses de campo con las ventajas y tipos existentes.

#### La pirámide de automatización

La denominada pirámide de automatización CIM, Computer Integrated Manufacturing por sus siglas en inglés (ComputerIntegratedManufacturing), expone gráficamente la forma en que se integran los procesos de manufactura de la producción con los sistemas de gestión de la empresa y la administración de los recursos (diseño, ingeniería, administración), así como las estructuras de comunicación del sistema en un entorno eficiente (Patache Allauca, 2013).

Se divide en niveles de acuerdo con el tráfico e información que se va a intercambiar. El CIM se planifica de arriba hacia abajo; sin embargo, durante la implementación se efectúa desde el nivel 0 al 4. Como se observa en la Figura 1, la pirámide de la automatización es un modelo jerarquizado con los programas y componentes que realizan la tarea de administrar la información de una empresa, en esta organización con jerarquía se destaca que, cada nivel se comunica directamente con el nivel superior el cual recibe comandos e información (Autycom, 2022).

**Figura 1***Pirámide de Automatización*

- **Nivel de campo:** es el nivel de producción donde se implementan todos los equipos físicos necesarios para la industria, tales como sensores, transductores, actuadores, circuitos de acondicionamiento y demás dispositivos para la interacción física con el entorno y monitoreo (Autycom, 2022).
- **Nivel de control:** en este nivel se encuentran los dispositivos que tienen como tarea controlar y ejecutar actividades principales o secundarias en la línea de producción. Además, se incluyen sistemas como procesadores, microcontroladores, PLC, sistemas PID. En resumen, son dispositivos que recolectan datos de los sensores para realizar acciones programadas (Autycom, 2022).
- **Nivel de supervisión:** este nivel implementa sistemas SCADA encargados de supervisar y, además, es una tecnología que combina los niveles anteriores para acceder a los datos y sistemas de control desde una única locación, también es capaz de monitorear y controlar los múltiples sistemas de la planta (Autycom, 2022).
- **Nivel de operación:** en este nivel se implementa un dispositivo de gestión de manufactura denominado MES (por sus siglas en inglés, *Manufacturing Execution System*), el cual monitorea los procesos de manufactura desde el principio de la cadena con la adquisición de la materia prima, todo el proceso de transformación hasta obtener el producto final y su

respectivo envío. Además, es capaz de detectar los errores de producción en referente a la demanda (Autycom, 2022).

- **Red de información:** este es el último nivel de la pirámide, donde se emplean tecnologías de gestión empresarial denominador ERP (Por sus siglas en inglés, *Enterprise Resource Planning*). Además, permite a las empresas monitorear los niveles de sus procesos de manufactura, ventas, adquisiciones, inventario y mantiene los procesos abiertos de manera eficiente para que todos los equipos pertenecientes a la empresa se encuentren en el mismo canal (Autycom, 2022).

La planta de nivel del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga basa su principio de automatización en la implementación e interconexión de un sensor ultrasónico y un procesador, lo cual indica que para este proyecto solo se va a interconectar un dispositivo de nivel de campo con uno de nivel de control a través de un bus de campo.

### **Control de nivel de fluidos**

En las industrias de producción continua que poseen transporte de fluidos como parte del proceso de manufactura de un producto requieren de manera importante contar con un sistema de control del volumen del fluido, con el fin de evitar que el líquido se derrame o se pierda en el proceso; se implementa un control en la medición del nivel del líquido que se esté colocando dentro del recipiente contenedor. Sin embargo, en la industria es un poco más complejo de resolver (Torres & Chanoluisa, 2015). A nivel industrial los sistemas implementados controlan el llenado eficiente de fluidos y operan tomando métricas directamente a la altura del fluido en comparación a una línea de referencia, controlados mediante transductores de señal y actuadores de forma autónoma por medio de controladores programables, para lograr obtener un control de nivel óptimo. Los sistemas poseen altos requisitos de precisión y exactitud en la toma de datos, especialmente cuando los recipientes

son de gran capacidad, con una tolerancia menor al 3 % para hacer posible la interpretación del nivel real, si no se cumple, se presenta grandes pérdidas económicas (Marin, 2001). Los sistemas de medición de nivel requieren incorporar un sistema de control inteligente para lograr de forma satisfactorio la ejecución de su tarea, por lo cual es pertinente la incorporación de uno para la planta de nivel.

### **Sistemas de Control**

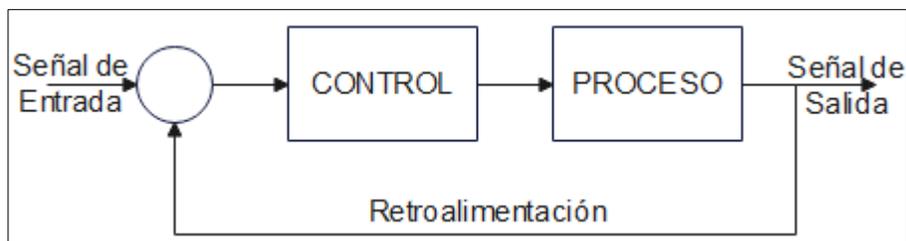
Los sistemas automáticos tienen la capacidad de iniciar y detener procesos sin la intervención manual de un usuario. Por este motivo se requiere obtener información del exterior, procesarla y emitir una señal de respuesta. En un automatismo la respuesta siempre va a ser la misma, pero si se tiene un robot u otro tipo de sistema, se tiene diferentes comportamientos que se ajustan a la necesidad según las circunstancias que se vayan presentando. Además, se dice que es un proceso es dinámico por naturaleza cuando se mantiene en constante cambio a causa de distintas perturbaciones, dado como resultado el control periódico de las diferentes variables del proceso (Andrade & Macas, 2010). Un sistema de control consta de:

- Entradas
- Elementos de control
- Salidas

En donde las entradas se conocen como señales y las salidas como variables a controlar. El sistema de control tiene como objetivo controlar las salidas por medio de las entradas a través de los elementos de control, tal como se ilustra en la Figura 2.

**Figura 2**

*Representación de un sistema de control*



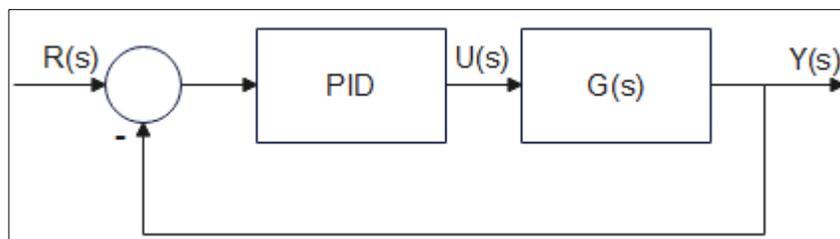
Se define que las entradas del sistema de control están compuestas por sensores, el proceso de control se hace a través de un sistema de cómputo (PLC, Tarjetas de desarrollo, computadores de mesa), el cual ejecuta el algoritmo sintonizado y las salidas se conforman por los respectivos actuadores. Existen diferentes algoritmos que se implementan en los sistemas de control automáticos, donde los algoritmos se seleccionan acorde a los requisitos de las tareas y la complejidad depende de la misma. Para la planta de nivel se realiza la implementación de un controlador automatizado de tipo PID (Cuadrado Comina & Gonzalez Bravo, 2022).

### **Control PID**

El PID es un algoritmo diseñado para controlar un sistema de lazo cerrado, son robustos e implementados en diversas aplicaciones a nivel industrial. La estructura de un controlador de este tipo es relativamente sencilla, cabe resaltar que un controlador PID no se implementa en sistemas que produzcan mucha inestabilidad dinámica (Mazzone, 2002). Para entender el controlador PID es necesario considerar un lazo de control de una entrada y una salida (un sistema SISO, por sus siglas en inglés Simple Input Simple Output) de un grado de libertad. La Figura 3 ilustra el diagrama de bloques del sistema SISO de un grado de libertad.

**Figura 3**

Diagrama de bloques del sistema SISO



El controlador PID incorpora tres acciones, las cuales son:

- **Acción proporcional (P):** Esta acción es directamente proporcional a la señal de error, es decir:  $u(t) = K_p * e(t)$ , entrega al sistema una ganancia de forma directa con desempeño limitado y produce una aceleración en la respuesta del sistema que disminuye en régimen estacionario, pero genera una inestabilidad de sobre amortiguamiento al sistema (Mazzone, 2002). Esta acción descrita por su función se representa como:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

- **Acción integral (I):** Esta acción de control tiene como fin disminuir el error en estado estacionario, es decir que sea igual a cero, esta acción actúa cuando se presenta una desviación entre la variable y la señal de referencia, la cual se encarga de integrar esta desviación en el tiempo generando una estabilidad en el sistema, esta acción provoca perturbaciones en el sistema si se sintoniza de forma inadecuada (Mazzone, 2002). La acción integral se representa como:

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad \text{Ecuación 2}$$

- **Acción derivativa (D):** Esta acción se emplea cuando hay un cambio en el valor absoluto del error, en este caso, esta acción se encarga de derivar de manera proporcional la diferencia entre la variable y la señal de referencia hasta mantenerla en cero y evitando que se vuelva a incrementar (Mazzone, 2002). Esta acción se representa como:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

Estas tres acciones combinadas dan como resultado un controlador con grandes ventajas (Mazzone, 2002), la ecuación que describe la acción combinada de este se representa mediante:

$$u(t) = Kp * e(t) + \frac{Ki}{Ti} * \int e(t)dt + Kd * Td * \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4}$$

## **Sensor**

Un sensor, también conocido como un transductor, es un elemento que posee una propiedad sensible a una magnitud específica en el entorno y convierte esta magnitud física en una señal eléctrica de tal manera que, si la magnitud varía, la señal eléctrica de salida varia acorde a esta (Guimeráns, 2018). Los sensores se caracterizan de acuerdo a la aplicación, en los cuales se destacan:

- Sensor de movimiento.
- Sensor de humedad.
- Sensor de temperatura.
- Sensor de imagen.
- Sensor de nivel.
- LDR.
- Sensor químico.
- Entre otros.

Para lograr realizar el control adecuado de una planta de nivel, se requiere la implementación de un sensor de nivel.

### ***Sensor de nivel***

Un sensor de nivel es un dispositivo electrónico el cual mide la altura de un material en específico, el cual comúnmente es un líquido que se encuentra al interior de un tanque u otro

recipiente. Además, son ideales para integrar en control de diversos procesos industriales (Eicos, 2022). Por último, los sensores de nivel se categorizan en dos tipos:

- **Sensor de nivel de punto:** comúnmente de salida booleana, son utilizados para detectar la altura de un fluido líquido a un determinado nivel preestablecido. Además, operan como alarma indicando un reboce por exceso del líquido cuando el nivel ha sido adquirido o como alarma de bajo nivel cuando el líquido se ha evacuado más del nivel crítico (Eicos, 2022).
- **Sensor de nivel continuo:** realizar un seguimiento del nivel del fluido dentro de un rango especificado, produciendo una señal de salida analógica correlacionada directamente con el nivel del tanque (Eicos, 2022).

Entre estas dos categorías de los sensores de nivel existen varias tecnologías que son aplicadas regularmente a nivel industrial, estas variaciones de diseño se categorizan en:

- **Interruptores de flotador:** el principio de funcionamiento se basa en un flotador magnético que se mueve en la superficie del líquido, este por su baja densidad y flotabilidad se eleva o cae con el nivel ascendente y respectivamente descendiente del líquido, el cual acciona un sellado de forma hermética (Reed switch) con unos anillos ubicados en el eje vertical y regulados para definir el porcentaje de nivel. Además, requiere un mantenimiento simple y por su practicidad es de fácil instalación y se utilizan para el control del flujo de agua en molinos y campos durante muchos años, estos interruptores modernos emplean circuitos eléctricos para conmutar la señal de salida (Doria, 2020). La Figura 4 muestra un interruptor de flotador magnético RLS-1000 para nivel de agua.

**Figura 4**

*Interruptor de nivel magnético de flotador*



- **Sensor de nivel ultrasónico sin contacto:** incorporan un procesador de señal analógica, microcontrolador y un circuito de acondicionamiento para la salida del controlador, también transmite los impulsos del emisor del microcontrolador a través de un procesador de la señal analógica del sensor y envía una onda ultrasónica a la superficie del líquido, el receptor detecta el eco de la superficie representando este retardo en una distancia entre el sensor y la superficie, el microcontrolador interno procesa las señales recibidas y calcula los valores para promediar el valor del eco recibido, este al ser sensor de nivel continuo, el microcontrolador convierte el valor en una señal analógica de 4 a 20mA linealizado respecto al nivel del líquido; cuando el eco no vuelve al sensor en un lapso de ocho segundos, el valor del sensor cae por debajo de los 4mA lo cual indica que hay una condición de bajo nivel (Hauser, 2022). La Figura 5 ilustra el sensor ultrasónico sin contacto XX218A3NHM12 de Schneider Electric.

**Figura 5***Sensor ultrasónico sin contacto*

- **Sensor de nivel ultrasónico de contacto:** se categorizan en la categoría de sensores de nivel de punto, este se basa en un par de cristales piezoeléctricos que están encapsulados en un material epóxico en la punta del transductor, los cristales cerámicos vibran a una frecuencia dada cuando se les aplica una tensión, el cristal de transmisión transforma el voltaje eléctrico en una señal ultrasónica, cuando hay líquido en los terminales el receptor recibe la oscilación y cuando no hay líquido la señal se atenúa y no es detectada por el receptor. Estos sensores no poseen partes móviles y no requieren calibración, normalmente la señal ultrasónica atraviesa un agujero de 12mm del sensor. Dichos sensores se implementan en tanques o ductos para el arranque automático de las bombas, válvulas solenoides y alarmas de alto o bajo nivel (Hauser, 2022). La Figura 6 ilustra el sensor ultrasónico de nivel sin contacto Echotel 940/941.

## Figura 6

*Sensor ultrasónico de contacto*



- **Sensor de nivel por presión:** este tipo de sensores vistos en la Figura 7 se caracterizan por medir la fuerza de un fluido en una superficie. Normalmente, se mide en pascales, bares o libras por pulgada cuadrada PSI (HBM, 2022).

## Figura 7

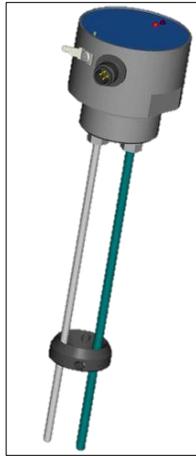
*Sensor de nivel por presión*



- **Sensor de nivel por capacitancia:** se categorizan como sensores de nivel puntual y continua, basados en la medición del nivel ante el cambio de la capacitancia interna. El sensor y la pared del tanque forman un capacitor cuya capacitancia depende de la cantidad de volumen presente en el recipiente, ya que el fluido se comporta como el medio dieléctrico (Hauser, 2022). La Figura 8 ilustra el sensor de nivel capacitivo NC56.

## Figura 8

*Sensor de nivel capacitivo*



## Tarjeta de desarrollo

Una tarjeta de desarrollo es un circuito electrónico compuesto por un microcontrolador, microprocesador, procesador o cualquier dispositivo lógico y elementos como puertos, conectores, reguladores, filtros y circuitos de acondicionamientos básicos que le permite a los usuarios acceder de manera fácil y rápida a los periféricos para realizar aplicaciones y pruebas. Los componentes principales que requieren una tarjeta de desarrollo son un microcontrolador, memoria, interfaz de hardware JTAG (por sus siglas en inglés, *Joint Test Action Group*) conector tipo USB o Jack. Las tarjetas de desarrollo que actualmente compiten en el mercado en eficiencia y aplicabilidad son las basadas en microcontroladores y procesadores ARM, basados en la arquitectura RISC con modificaciones específicas que optimiza el uso de los recursos como la implementación de memorias y periféricos, reduciendo el consumo eléctrico y aumentando la capacidad de procesamiento, a través de su procesador core; lo cual ha hecho que sea rentable al momento de diseñar sistemas embebidos (Palma Castro & Rodríguez Osorio, 2011). En el mercado existe una gran variedad de tarjetas de desarrollo que implementan procesador ARM, en las cuales se destacan:

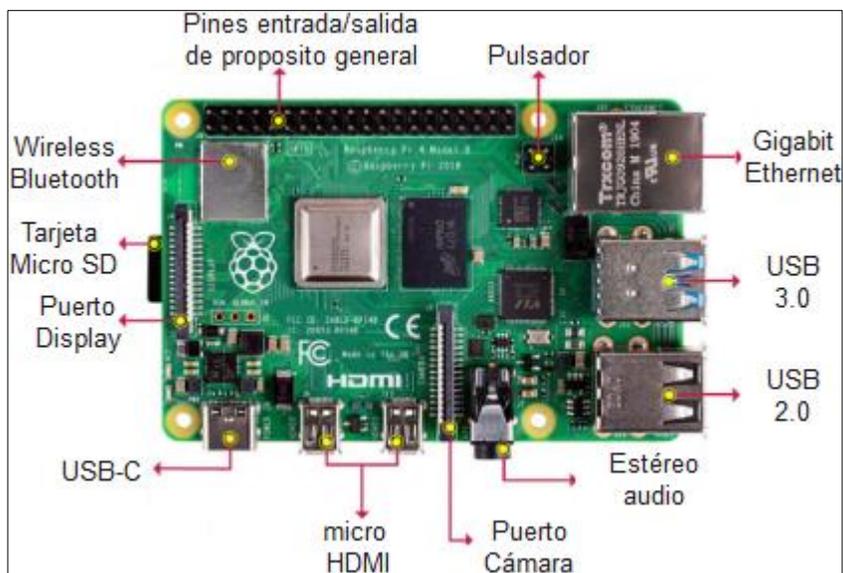
- The Maple.

- Beagle Board.
- Beagle PLC.
- Arduino.
- Mbed.
- Raspberry Pi.
- LPC1769 LPCxpresso Board.
- Netduino.

Actualmente la planta de nivel cuenta con una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 4B, por lo cual se va a hacer uso de esta.

### **Raspberry Pi 4 Model B**

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo con dimensiones reducidas cuyo consumo en reposo es de 2.7 W y cuando está operativa posee un consumo de 6.4 W. Además, las funciones de operación están basadas en un sistema operativo Linux, esta cuenta con un GPIO de 40 pines que opera a un nivel de tensión de 3.3Vdc, cuenta con un procesador ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos de 64 bits a 1.5GHz, memoria SDRAM de 4GB, 2 puertos USB 3.0, 2 puertos USB 2.0, un driver Gigabit Ethernet, conexión Bluetooth 5.0 BLE, conexión wifi IEEE 802.11ac compatible con frecuencias de 2.4GHz y 5GHz, driver gráfico OpenGL ES 3.0, puerto de pantalla HDMI y MIPI DSI de 2 vías (Raspberry, 2022). La Figura 9 ilustra la arquitectura de la Raspberry Pi 4 Model B.

**Figura 9***Raspberry Pi4 Modelo B*

Para el presente proyecto, se requiere intercomunicar el sensor de nivel con la Raspberry Pi a través de un bus de campo de bajo presupuesto.

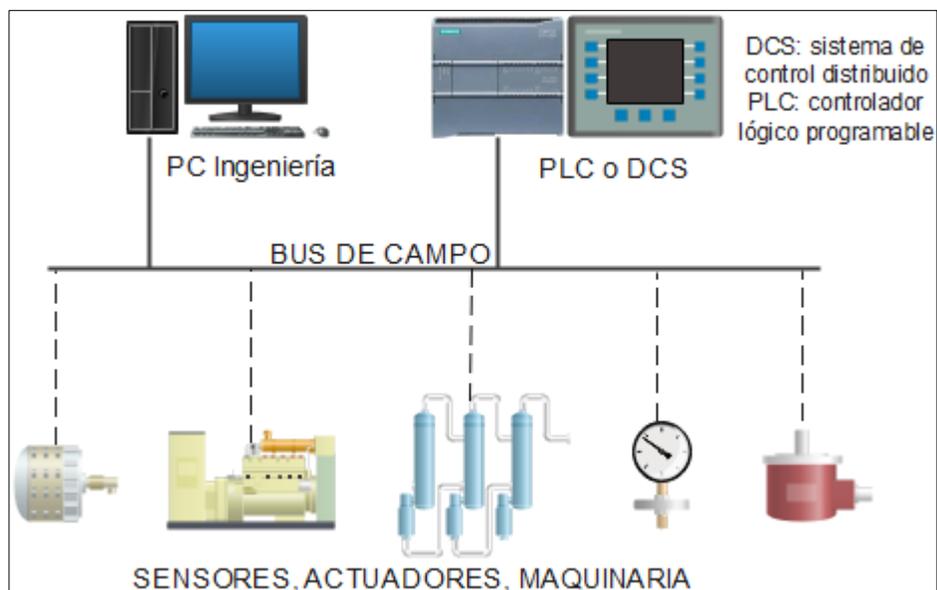
### **Buses de Campo**

Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipos de uso industrial en procesos de fabricación. El trabajo del bus de campo es reemplazar las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y los dispositivos de control tradicional de bucle de corriente de 4-20 mA. Redes típicamente digitales, bidireccionales y multipunto, instaladas en buses seriales que conectan dispositivos de campo como PLC, sensores, actuadores y convertidores (Matos, 2011).

Cada dispositivo de campo tiene capacidades informáticas integradas que lo hacen inteligente a bajo costo. Además, cada uno de estos elementos realizan funciones sencillas de diagnóstico, control y servicio, así como comunicación bidireccional sobre el bus, tal como se ilustra en la Figura 10.

**Figura 10**

*Representación de un bus de campo*



El objetivo es reemplazar el sistema de control centralizado con una red de control distribuido que mejora la calidad del producto, reducir los costos y aumentar la eficiencia. Para ello, se basa en que la información que envían y/o reciben los dispositivos de campo es digital, mucho más precisa que utilizando métodos analógicos. Además, es un dispositivo inteligente que realiza funciones de control, mantenimiento y diagnóstico. De esta forma, cada nodo de la red reporta un problema con un dispositivo relacionado y, en general, cualquier problema relacionado con ese dispositivo. Dicho monitoreo aumenta el rendimiento del sistema y reducir la cantidad de horas de mantenimiento requeridas.

### ***Ventajas de un bus de campo***

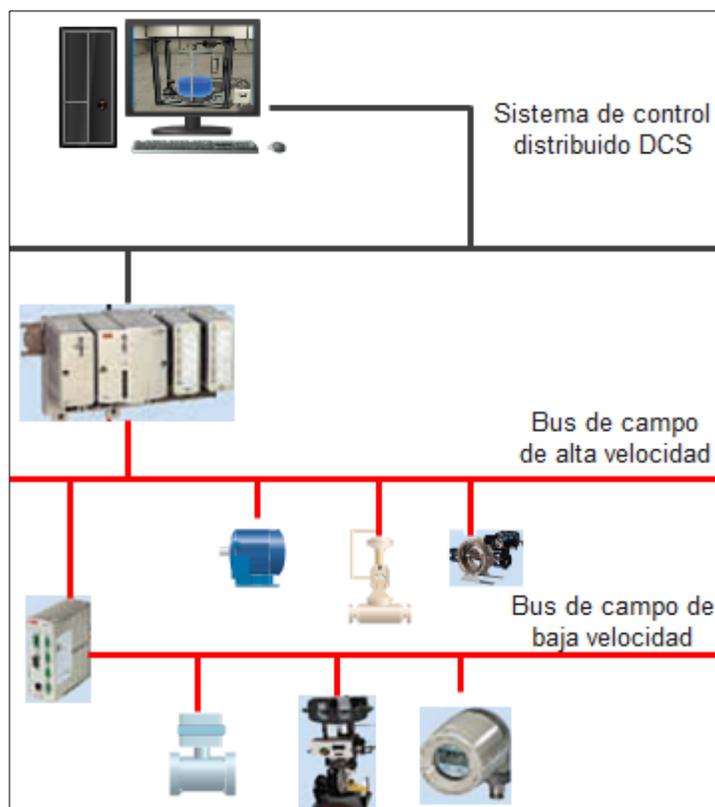
El principal beneficio que ofrecen los buses de campo (ver Figura 11) y lo que los hace más atractivos para los usuarios finales es la reducción de costos. Los ahorros provienen de tres áreas principales de los costos como instalación, mantenimiento y rendimiento mejorado del sistema. Una de las características clave de los buses de campo es que reducen en gran medida el cableado necesario para las instalaciones de control. Solo se requiere un cable por

componente para conectar diferentes nodos. Se estima que reduce los costos de cableado de 5 a 1. Frente a otro tipo de redes, cuenta con herramientas de gestión de bus que reducen el tiempo de instalación y puesta en marcha (Matos, 2011). El intercambio se lleva a cabo por medio de un mecanismo estándar, entre sus ventajas más importantes se detallan a continuación:

- Flexibilidad de extensión.
- Conexión de módulos diferentes en una misma línea.
- Posibilidad de conexión de dispositivos de diferentes procedencias.
- Distancias operativas superiores al cableado tradicional.
- Reducción masiva de cables y costo asociado.
- Simplificación de la puesta en servicio.

### Figura 11

*Arquitectura de un bus de campo*



En cuanto se refiere a las desventajas están los costos globales inicialmente superiores, la inversión de instrumentación y accesorios de diagnóstico y la necesidad de conocimientos superiores.

### ***Tipos de Buses de Campo***

Hoy en día se encuentra en el mercado muchos dispositivos o módulos de buses de campo para comunicaciones de varios fabricantes como SIEMENS, Endress & Hauser, ABB, Telemecanique, Twido, Omrom, Wago, etc. Combinan muchas tecnologías de tal forma que ofrecen muchos dispositivos diferentes a una misma aplicación y por ello se tiene las siguientes clasificaciones (Arias, 2013):

- Buses de campo de alta velocidad y baja funcionalidad.
- Buses de campo de alta velocidad y funcionalidad media.
- Buses de campo de altas prestaciones.
- Buses de campo para áreas de seguridad intrínseca.

La mayoría de los buses trabajan en el nivel 1 con interfaz RS 485, entre los más usados se encuentran los siguientes:

- **AS-i (Actuator Sensor Interface):** este protocolo es desarrollado por la empresa mundial Siemens, AS-i se ajusta de acuerdo a los requisitos de nivel de automatización más bajo de la pirámide y es considerado un protocolo de comunicación de estándar abierto, bajo este protocolo operan sensores y actuadores en primer nivel de control, conocidos como el bus de dispositivos. Actualmente en el mercado hay una gran variedad de sensores-actuadores inteligentes compatibles con AS-i, este bus es rápido, sencillo, rentable, posee una aplicabilidad segura y da buena proyección a futuro, ya que, un gran número de fabricantes ofrecen productos compatibles (Türkiye, 2022).
- **BITBUS:** este es un bus de control para sistemas master/slave que fue diseñado por Intel, soporta hasta 250 nodos y distancias desde 30 metros a cientos de metros en nodo auto

sincronizado. Además, tiene como propósito transmitir información de control de longitud corta a distancias largas a alta velocidad, proporciona protocolos de enlace y transferencia de información en entornos de múltiples tareas y órdenes de entrada/salida remota en diversas aplicaciones. Este protocolo tiene como fin el proporcionar una arquitectura de interconexiones de alta velocidad para sistemas jerárquicos, ya sea de un solo nivel o varios niveles (Intel, 1988).

- **FieldBus en OSI:** este modelo es un estándar reconocido de manera internacional para comunicación abierto. Además, se desarrolla como un modelo para interconectar dispositivos de tres capas y ejecutar todas las funciones agrupando conjuntos lógicos (Berge, 2002).
- **Modbus:** es un protocolo de comunicación serie desarrollado por la empresa Modicon en 1979. En un principio, la implementación de Modbus estaba orientada a interconectar operadores lógicos programables de Modico, pero lo estandarizaron de forma abierta y ahora es uno de los protocolos de comunicaciones más implementados en entornos industriales, sistemas de control, domótica, inmótica, entre otros, ya que establece una conexión Maestro/Esclavo y transmite la información entre dispositivos electrónicos conectados en un mismo bus. El estándar de Modbus es de dominio público, lo que permite que los fabricantes puedan desarrollar sus componentes sin regalías aplicadas al protocolo, lo que facilita el acceso a la información y la estructura que además es muy sencilla y funcional en su funcionamiento. Técnicamente implementar un bus tipo Modbus se realiza de forma sencilla y el tiempo de desarrollo se acorta de manera considerable respecto a otros protocolos que poseen estructuras de tramos complicados y que utilizan estructuras complejas para acceder a los datos que son almacenados. La transmisión de datos con Modbus no está comprometida a ningún tipo de datos en específico, lo que permite flexibilidad en el intercambio de información (Inc., 2002).

- **Profibus (PROcess Field BUS):** este es el bus líder en Europa impulsado por los fabricantes ABB, AEG, Siemens, Bauer, Danfoss, Klóckner, Móeller, entre otros. Además, es un bus de campo abierto el cual se implementan en diversas áreas como procesos de manufactura, inmótica, domótica; este se encuentra estandarizado en la norma europea EN 50170, lo que garantiza gran confianza a los usuarios y garantiza que presta sin problema la intercomunicación de dispositivos de diferentes fabricantes sin necesidad de realizar ajustes personalizados de interfaz, en la actualidad existen varias versiones de este protocolo. Profibus-PA se diseña para comunicación rápida con unidades descentralizadas donde se incorpora un maestro y varios esclavos. Profibus-FMS es compatible con una tecnología que permite la ejecución en aplicaciones de áreas con riesgo de explosión. Finalmente, Profibus-DP se implementa para la comunicación de sistemas autómatas donde se enfoca la funcionalidad en transmisión de datos complejos sin dar relevancia a la velocidad de comunicación (Profibus, 2022).

## Capítulo III

### Metodología

El capítulo metodológico involucra la modalidad, tipos y diseño de la investigación y los métodos de carácter bibliográfico documental y experimental.

#### **Modalidad de la investigación**

Del presente trabajo de titulación se medirá el nivel de un tanque, añadiendo un sensor y un protocolo de comunicación por medio de un módulo de bus de campo a bajo costo a la planta de nivel existente, ubicada en el Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

#### ***Método bibliográfico documental***

Por medio de este método se realiza un análisis de toda la información relevante sobre la planta de nivel. La información depende de manera directa de los documentos que dan veracidad de las distintas investigaciones, estos son tomados de las bases digitales académicas, libros, artículos de revistas, entre otros.

#### ***Método experimental***

Con este método se realiza una recopilación de los datos de nivel de la altura del tanque del proceso de llenado y se realiza la comparación con el sensor ultrasónico existente de la tesis anterior "MB7369".

#### **Tipos de investigación**

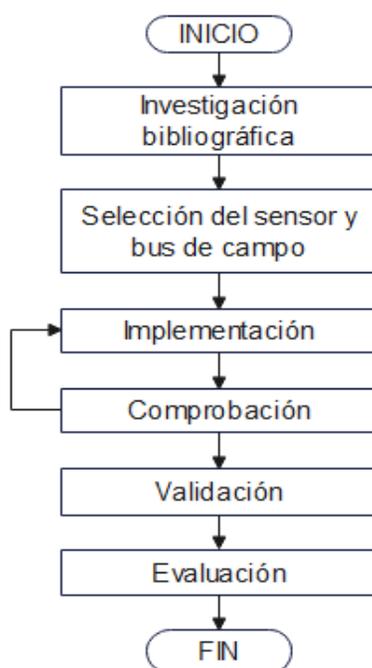
Se emplea el tipo de investigación cuantitativa para la obtención de los valores de llenado del tanque de la planta de nivel.

## Diseño de la investigación

La Figura 12 muestra el esquema de la metodología propuesta, la cual permitirá desarrollar de forma correcta la implementación de la comunicación industrial a bajo costo en la planta de nivel por medio de un dispositivo de comunicación y así obtener datos con mayor eficiencia.

### Figura 12

*Metodología del proyecto de investigación*



#### ***Investigación bibliográfica***

En esta etapa se recopila la información bibliográfica válida con el fin de conocer los tipos de buses de campo y el tipo de sensor ultrasónico sin contacto, partiendo de las condiciones iniciales de la planta.

#### ***Selección del sensor y bus de campo***

Se procede con la selección del sensor y el bus de campo basados en las especificaciones técnicas y condiciones de la planta de nivel existente.

### ***Implementación***

Luego de la selección del sensor y bus de campo, se procederá con la implementación del protocolo de comunicación en la planta.

### ***Comprobación***

En esta etapa se realiza una comprobación del sistema, es decir, verificar si el sensor y bus de campo funcionan correctamente.

### ***Validación***

Para la constatación del proyecto se deben realizar múltiples pruebas de funcionamiento del equipo, entre ellos se debe realizar la prueba principal para analizar el comportamiento del sistema en el estado estable y transitorio.

### ***Evaluación***

Realizar el análisis de resultados del sistema basados en el error en estado estable y tiempo de establecimiento de los controladores propuestos por los tesisistas Cuadrado Comina y González Bravo. Además, se realizará una comparación de nivel entre el sensor M7369 de la tesis anterior y el actual a proponer (ver Apartado IV). Finalmente, se colocarán pesos para evaluar el error porcentual del sistema.

### **Técnicas de recolección de datos**

Las técnicas consideradas son las siguientes:

- Técnicas de campo: se emplea toda la información que permita recolectar, analizar y transmitir el objeto de estudio, que en este caso es la obtención de un protocolo de comunicación con un sensor de bajo costo para la planta de nivel. Por tanto, las pruebas de funcionamiento son de carácter cuantitativo.

- Técnica documental: la información se recopila para la elaboración del proyecto, de fuentes bibliográficas nacionales e internacionales.

## Capítulo IV

### Propuesta de diseño

En el presente capítulo se realiza la propuesta de diseño del protocolo de comunicación modbus e interfaz gráfica HMI tomando como base las condiciones iniciales en las que se encuentra la planta de nivel y mejorando así su rendimiento.

#### Condiciones físicas de la planta de nivel

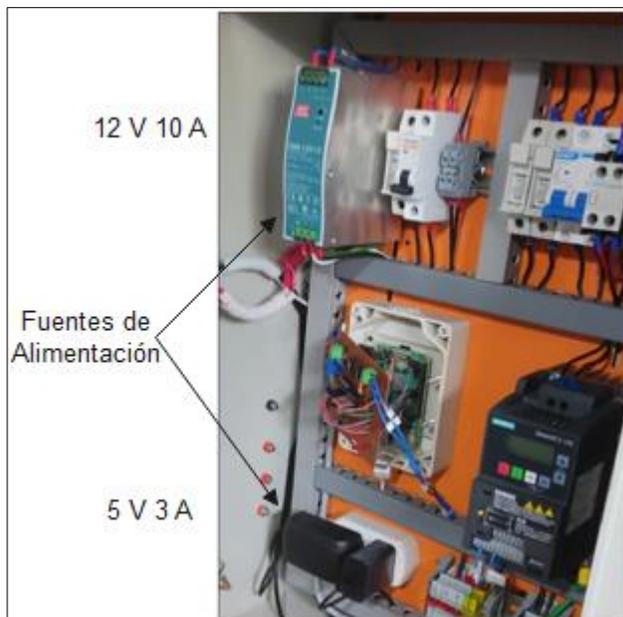
Para el inicio del diseño se requiere obtener los datos físicos de la planta como es el caso del volumen del tanque, la alimentación eléctrica, etc. Con los cuales se procederá al diseño del protocolo de comunicación de la planta, así también, para la selección del sensor. Principalmente se requiere la medida del tanque principal tomado de la tesis principal propuesto por Garcés Pico y León Calderón (2015, pág. 110) con el fin de seleccionar el sensor y protocolo de comunicación compatible con la planta.

Parte de los datos que se requieren para el diseño es la altura y el diámetro del tanque cilíndrico para así obtener su volumen. Estos datos son altura 0,7 y diámetro circular 0,15 metros dando como resultado un volumen de 12,37 litros. La altura definirá el alcance que debe tener el sensor de nivel.

Otro parámetro que influye en el diseño de los dispositivos electrónicos y de comunicación es el voltaje de alimentación, ya que este parámetro hace funcionar al dispositivo. Actualmente, la planta de nivel cuenta con tres fuentes de alimentación (ver Figura 13) ubicados en el tablero presentado por Cuadrado Comina y González Bravo (2022, pág. 76) detallados a continuación:

### Figura 13

*Fuentes de alimentación existentes en la planta de nivel*



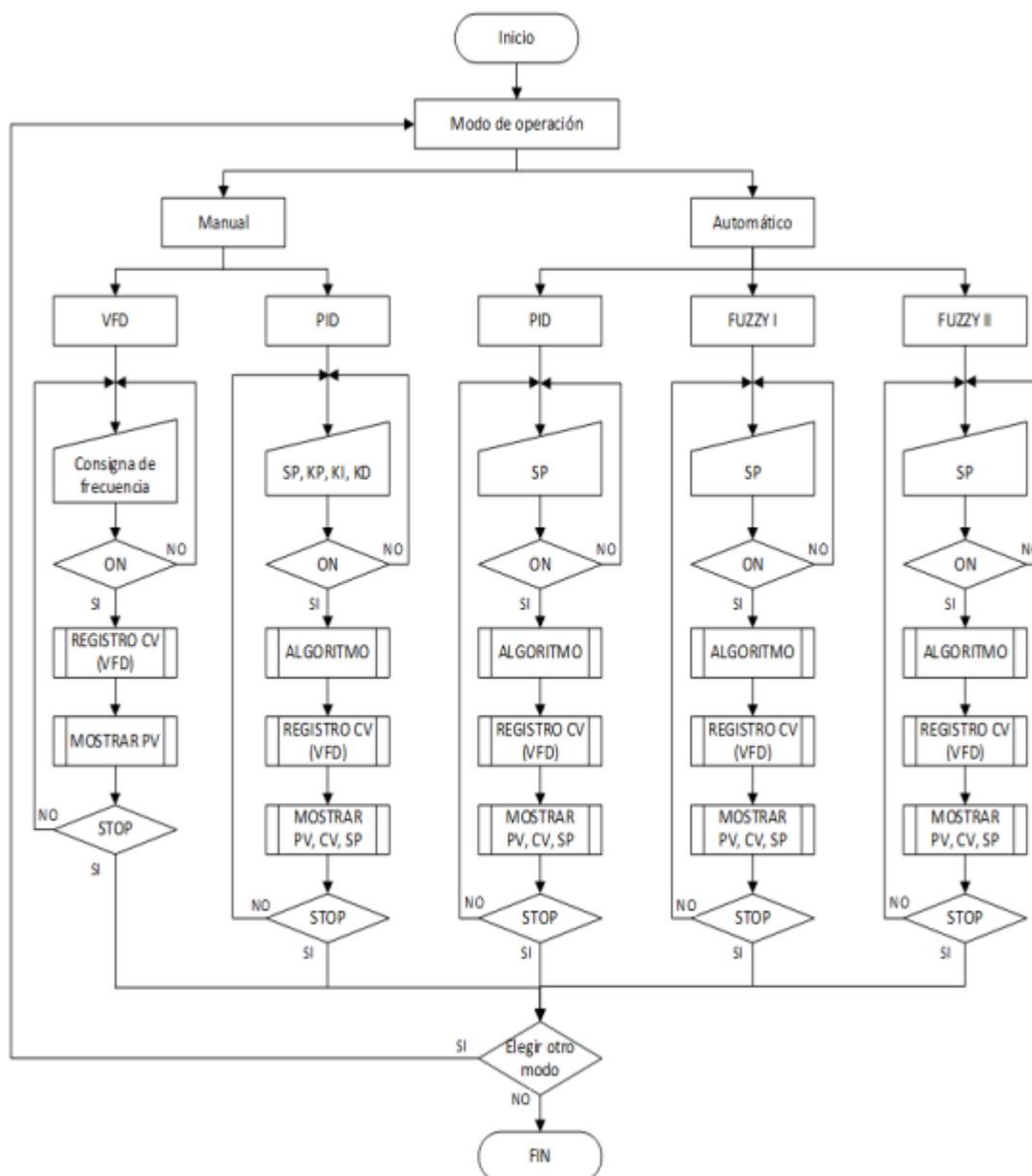
- Una fuente de 12V y 10A que suministra voltaje al circuito de acondicionamiento del sensor MB7369.
- También posee una fuente de 5V y 3A que alimenta a la tarjeta Raspberry Pi ( $I = 1,28A$ ) y al sensor MB7369 de bajo consumo eléctrico.
- Finalmente, dispone de otra fuente de 5V y 3A conectada a la pantalla táctil de 7 pulgadas cuyo consumo es de 3A.

Para el diseño del protocolo de comunicación se debe tomar en cuenta los dispositivos electrónicos o tarjetas existentes de la planta, como es la Raspberry Pi 4 modelo B que posee puertos o pines de comunicación, tales como: 2 pines de propósito general Recepción y Transmisión, USB, Ethernet y HDMI.

La planta de nivel cuenta con dos modos de operación, manual y automático tal como lo mencionan Cuadrado Comina y González Bravo (2022, pág. 78), visto en la Figura 14.

Figura 14

Lógica de control de nivel



El modo manual implica que el usuario debe ingresar los parámetros internos de los controladores como la consigna de frecuencia del Fuzzy o el valor de seteo SP para definir el nivel del tanque y los valores proporcional  $K_p$ , integral  $K_i$  y derivativo  $K_d$  del PID. Sin embargo, este modo se dice que es tipo controlado, ya que el variador de frecuencia VFD recibe una señal por parte del controlador para comenzar con el proceso de llenado o vaciado de agua en

el tanque hasta que el usuario finalice la operación en la planta. En cambio, durante el modo automático los parámetros internos del PID y Fuzzy son preestablecidos dentro del algoritmo de control, por lo que la única variable a modificarse en el HMI es el valor SP y luego proceda con la operación de la planta de nivel. Finalmente, se observa a través de una pantalla los valores actual PV, variador CV y SP junto a una gráfica de nivel en el transcurso del tiempo de operación de la planta.

### **Selección del sensor de nivel**

Para llevar a cabo una buena selección del sensor de nivel, se debe conocer ciertas características, tales como:

- Voltaje de alimentación: es necesario conocer el voltaje a la cual se alimenta el sensor.
- Señal de salida: este parámetro indica que tipo de señal posee el sensor para prever el dispositivo de bus de campo.
- Temperatura de operación: con ello se define si se trabaja con temperatura ambiental o del fluido.
- Grado de protección integral IP: se utiliza para la protección contra la entrada de materiales extraños al sensor, tales como objetos sólidos, polvo, goteos, chorros y/o están sumergidos en el agua.
- Rango de medición: es necesario conocer los rangos mínimo y máximo que posee cada sensor, con el propósito de determinar si es apto o no para el nivel del tanque cilíndrico de la planta.
- Precisión: en un dispositivo se refiere a la dispersión de los datos medidos y repetidos. Esta dispersión es inversamente proporcional a la precisión, es decir, si se disminuye la dispersión de los datos medidos, mayor es la precisión.

- Exactitud: este parámetro ayuda a determinar en la salida del sensor cuan cercano es el valor medido al verdadero, es decir, si la toma de datos de la salida del sensor está más cerca del valor real, el error disminuye.
- Precio comercial: la propuesta del proyecto consiste en utilizar dispositivos de bajo costo, por lo que con el precio disponible en el mercado ayudará a determinar qué sensor es más económico.

Para el diseño de un sensor se debe tener en cuenta los parámetros antes mencionados como son:

- Voltaje de alimentación de 5 o 12 V, los cuales se encuentran en la planta.
- La señal de salida del sensor debe estar en el rango entre 4 a 20 mA.
- El sensor trabaja con temperatura entre 20°C a 30°C.
- Se requiere una protección mínima IP51 cuando el sensor está ubicado fuera del tanque e IP58 si está instalado dentro del tanque.
- Se necesita que la medición de la altura del líquido esté entre 0 a 70 cm.
- Se define una precisión y exactitud aceptable menor o igual al 5 %.
- Los sensores presentan diversos costos en el mercado, por lo que se define como precios bajos cuando es menor o igual a \$ 100, altos si son mayores o iguales a \$ 200 y medios cuando está entre \$ 100 y \$ 200. Por lo tanto, se considera un sensor de bajo costo ante un valor menor o igual a los \$100.

Una vez que se definen los parámetros de diseño, se detalla las características de los sensores de nivel, tal como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1***Características de los sensores de nivel*

Características									
Voltaje de alimentación	V	2,7-5,5	✓	10-30	✓	12	✓	10-28	✓
Vcc									
Señal de salida	mA	-		4-20	✓	4-20	✓	4-20	✓
	V	Vcc/5/120	✗	-		-		0/1-5	✗
Temperatura de operación	°C	-4,4 a 65	✓	-20 a 60	✓	-20 a 60	✓	0-50	✓
Protección integral	IP	67	✓	68	✓	65	✓	65	✓
Rango de medición	Mts	0-5	✓	0-5	✓	0,2-5	✗	0-15	✓
Precisión	%	1,0	✓	0,5	✓	0,2	✓	0,5	✓
Exactitud	%	1,0	✓	0,2	✓	0,05	✓	0,1	✓
Precio comercial	\$	126,44 (medio)	✗	55,44 (bajo)	✓	1.579 (alto)	✗	120 (medio)	✗

Acorde a las características mencionadas en la Tabla 1, se selecciona el sensor EAMPPT-136 ya que cumple con todos los parámetros de diseño. En lo que respecta al resto de sensores como el MB7369, LVU 816, UE 3001 y nMi-3 no cumplen. Por ejemplo, el MB7369 no posee la señal de corriente a la salida, el LVU 816 y nMi-3 no son capaces de medir una altura menor a los 20 y 10 cm; respectivamente. Por último, el UE 3001 posee un costo de \$120, el cual es superior al EAMPPT-136 y mayor a \$100, por lo que se considera un precio comercial medio.

## Selección del bus de campo

Para llevar a cabo una buena selección del bus de campo, se debe conocer ciertas características, tales como:

- Acceso al medio: es necesario conocer cómo trabaja el bus de campo, es decir, si opera bajo el modo maestro/esclavo M/E, multimaestro MM o si posee ambas.
- Esclavos: es la cantidad máxima que tiene el bus de campo para conectar sensores y actuadores hacia el controlador (maestro).
- Medio físico: ayuda a la transmisión de los datos del sensor, el cual debe pasar a través del bus de campo para que llegue la información al controlador.
- Protocolo: es necesario conocer si la configuración del bus de campo está disponible al público (estándar abierto) o no.
- Precio mínimo comercial: la propuesta del proyecto consiste en utilizar de bajo costo, por lo que con el precio disponible en el mercado ayudará a determinar qué bus de campo es más económico.
- Uso en la industria: es necesario conocer si el bus de campo tiene campo de aplicación actualmente en la industria o no.

Para el diseño de un bus de campo se debe tener en cuenta los parámetros antes mencionados, tales como:

- Acceso al medio: el bus de campo tiene la capacidad de intercambiar a la información entre el sensor y el controlador (raspberry Pi), por tanto, debe ser maestro/esclavo.
- Esclavos: como se utiliza un sensor de nivel en la propuesta actual, se necesita 1 esclavo.
- Medio físico: el bus de campo debe contener al menos el medio de conexión de 4 a 20 mA, debido a la señal de salida del sensor EAMPPT-136.
- Protocolo: es necesario que sea un estándar abierto para realizar la configuración del bus de campo.

- Los buses de campo presentan diversos costos en el mercado, por lo que se define como precios bajos mínimos cuando es menor o igual a \$ 50.
- Se define que el bus de campo sea altamente utilizado en los procesos a nivel industrial.

Una vez que se definen los parámetros de diseño, se detalla las características de los buses de campo, tal como se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Características de los buses de campo*

Detalles	AS-i	Bitbus	Fieldbus	Profibus	Modbus
Acceso al medio	M/E	M/E	MM	M/E y MM	M/E y MM
Esclavos	32	240	240	240	64
Medio físico	PT (par trenzado) datos digitales	PT, coaxial, FO (fibra óptica)	PT (Rs-485), FO, RF (radio frecuencia), RJ45 (EtherCAT)	PT (Rs-485), FO	PT (Rs-485), FO, 4-20 mA, 0-5/10V RJ45 (Ethernet)
Protocolo	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Precio mínimo comercial	\$20 (bajo)	-	\$100 (alto)	\$30 (bajo)	\$20 (bajo)
Uso en la industria	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto

Acorde a las características mencionadas en la Tabla 2, se selecciona el bus de campo Modbus ya que cumple con todos los parámetros de diseño. En cambio, el resto de los buses campo de tipo AS-i, Bitbus, Fieldbus y Profibus no cumplen ya que no cuentan con el medio físico principal de 4 a 20 mA que posee la señal de salida del sensor de nivel EAMPPT-136.

## Selección del dispositivo modbus

Para llevar a cabo una buena selección del dispositivo modbus, se debe conocer ciertas características, tales como:

- Voltaje de alimentación: es necesario conocer el voltaje a la cual se alimenta el dispositivo modbus.
- Entrada: debe tener la misma señal de salida del sensor, es decir, entre 4 a 20 mA.
- Salida: es necesario conocer el medio de comunicación del modbus para el envío de información del sensor al controlador.
- Precio comercial: la propuesta del proyecto consiste en utilizar dispositivos de bajo costo, por lo que con el precio disponible en el mercado ayudará a determinar qué dispositivo es más económico.

Para el diseño del dispositivo modbus se debe tener en cuenta los parámetros antes mencionados, tales como:

- El voltaje de alimentación debe ser de 5 o 12 V, los cuales se encuentran en la planta.
- La conexión de entrada debe ser de 4 a 20 mA ya que la salida del sensor EAMPPT-136 se conecta a la entrada del dispositivo modbus.
- La conexión de salida puede ser de tipo RS485 y/o Ethernet.
- Los dispositivos modbus presentan diversos costos en el mercado, por lo que se define como precios bajos cuando es menor o igual a \$ 50, altos si son mayores o iguales a \$ 200 y medios cuando está entre \$ 50 a \$ 200. Por lo tanto, se considera un modbus de bajo costo ante un valor menor o igual a los \$ 50.

Una vez que se definen los parámetros de diseño, se detalla las características de los dispositivos modbus, tal como se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Características de los dispositivos modbus*

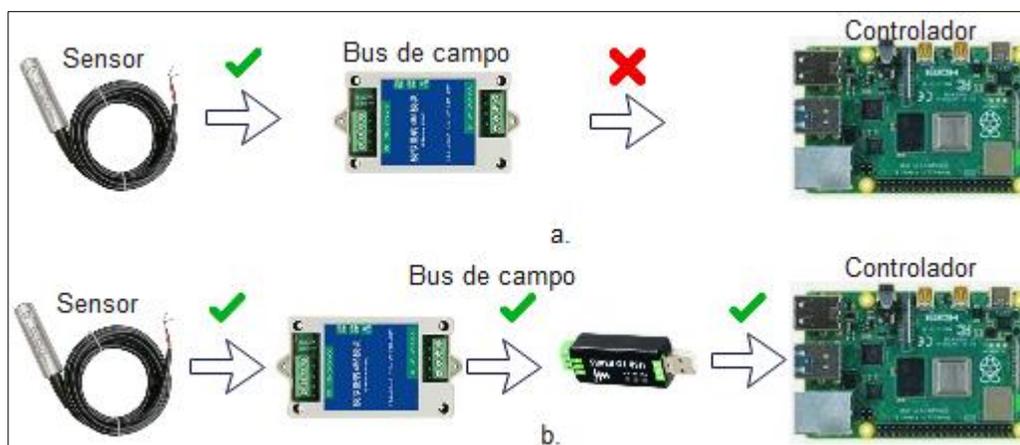
Características de conexión	Taidacent AD multicanal	USR-DR302	USR-M511	Taidacent 8 analógico
Alimentación	10 – 30 V	5 – 36 V	5 – 36 V	5 – 30 V
Entrada	4 – 20 mA	RS485	RS232/485/422	4 – 20 mA
Salida	RS485	Ethernet	Ethernet	RS485
Precio comercial	(\$ 22,58) Bajo	(\$ 38,72) Bajo	(\$ 225,00) Alto	(\$ 59,95) Medio

Acorde a las características mencionadas en la Tabla 3, se selecciona el modbus Taidacent AD multicanal ya que cumple con todos los parámetros de diseño. En cambio, el resto de los módulos como el USR-DR302, USR-M511 y Taidacent 8 analógico no cumplen. Por ejemplo, los modbus USR-DR302 y USR-M511 no cuentan con una entrada de 4 a 20 mA. Y el módulo Taidacent 8 analógico (\$ 59,95) no se considera debido a que el precio es mayor que el Taidacent AD multicanal (\$ 22,58).

El módulo Taidacent AD multicanal dispone del estándar de comunicación RS485 a la salida, este no dispone de una conexión directa con la Raspberry Pi4 modelo B, tal como se muestra en la Figura 15.a. De modo que se añade un convertidor Waveshare que convierte la señal de datos RS485 a USB visto en la Figura 15.b.

**Figura 15**

*Selección de dispositivos para el bus de campo*

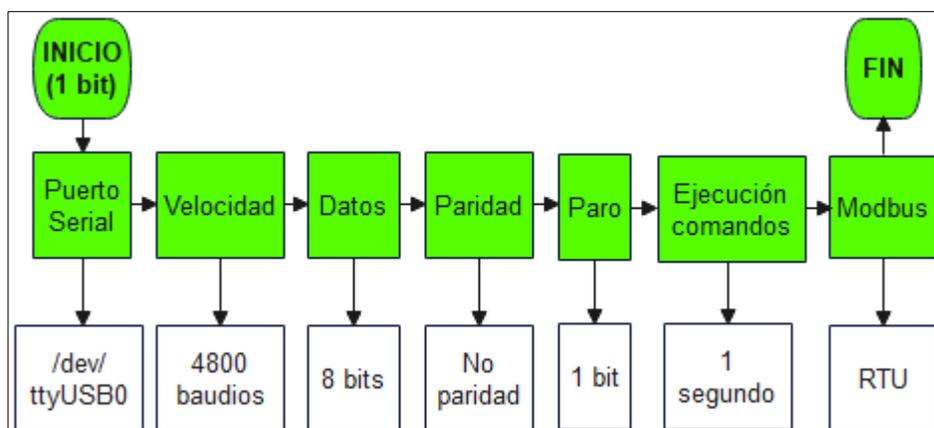


### **Protocolo de comunicación Modbus RTU**

El protocolo de comunicación que se lleva a cabo para la lectura del sensor de nivel EAMPPT-136, este se realiza a través de la tarjeta Raspberry Pi4 modelo B, por medio del cual se configuran los parámetros de comunicación bajo el modo modbus RTU que es similar a la comunicación serial, es decir, utiliza un puerto en serie “/dev/ttyUSB0”, dispone 8 bits de datos a una velocidad de 4800 baudios, 0 bits de paridad, 1 bit de paro, un tiempo de espera de 1 segundo para la ejecución de un comando de puerto serial y se ejecuta bajo el modo modbus RTU, visto en la Figura 16.

Figura 16

Protocolo de comunicación modbus RTU



### Diseño de la interfaz gráfica HMI

La implementación HMI se desarrolla a través de la interfaz Tkinter, disponible en Python, cuyo lenguaje se utiliza en la Raspberry Pi. Esta interfaz crea widgets (bloques pequeños) personales para la creación de eventos y ventanas, visto en la Figura 17 donde se tiene una pantalla de inicio.

Figura 17

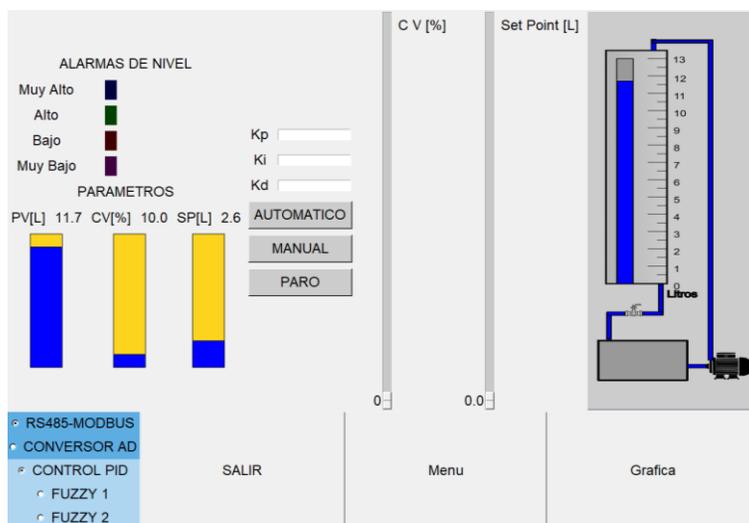
Pantalla de inicio



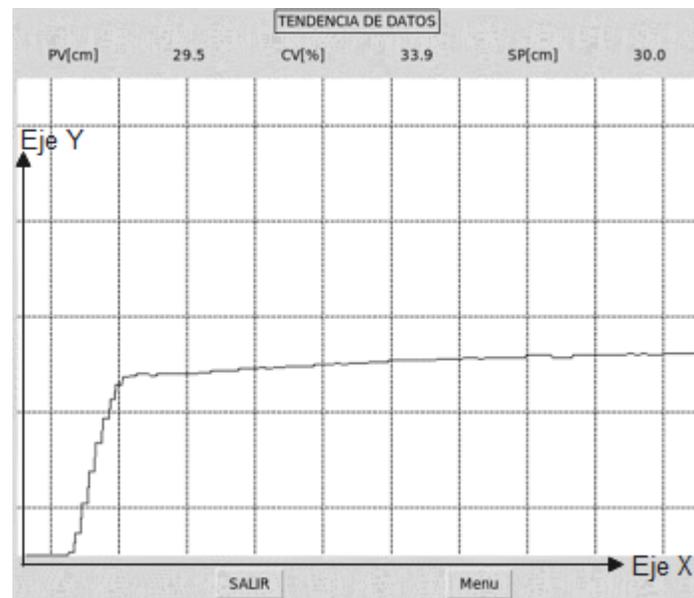
En la Figura 18 se presenta la interfaz donde se va a llevar a cabo el control de nivel bajo los modos de operación manual y automático. Además, dispone de un botón de PARO del proceso y otros parámetros, tales como: espacios para la designación de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  del controlador PID en el modo manual, cuatro alarmas de nivel para indicar si el líquido de un tanque es muy bajo, muy alto, bajo o alto, selección de sensores de nivel EAMPPT-136 (RS485-MODBUS) y MB7369 (CONVERSION AD), controladores PID, Fuzzy 1 y 2 para el modo automático, visualización del valor actual PV (L), CV (%) y SP (L).

**Figura 18**

*Interfaz HMI*



En la Figura 19 se tiene una ventana donde se visualizan los valores PV, CV y SP en tiempo real de la planta de nivel. Además, se observa el comportamiento de nivel PV (eje Y) en el transcurso del tiempo (eje X).

**Figura 19***Tendencia de datos*

## Capítulo V

### Análisis de Resultados

En este Apartado se realiza las pruebas de funcionamiento de los sensores de nivel y análisis de los parámetros del comportamiento de la planta con/sin perturbación con el propósito de analizar el error en estado estable y tiempo de establecimiento. A su vez se determina el error porcentual en base a los valores exactos y medidos.

#### Comprobación del envío de datos del sensor de nivel

En este apartado se realizaron las pruebas correspondientes del sensor EAMPPT-136 para comprobar el funcionamiento adecuado por medio del cambio de nivel de líquido en la planta. Otras pruebas realizadas es el cambio brusco o inmediato del nivel para observar su comportamiento. Como se conoce el sensor EAMPPT-136 presenta una salida de 4 a 20 mA, el cual mide una distancia de 0 a 5 m, es decir, que los 4 mA representa 0 m y 20 mA implica una distancia de 5 m; por tanto, se asume una salida lineal y se aplica la Ecuación 5 para determinar el amperaje teórico "At" proporcional al nivel. Por ejemplo, si se tiene un nivel de 10 cm, se calcula un amperaje de 4,32 mA de acuerdo con la ecuación 5 y así sucesivamente se obtienen los valores de amperaje teóricos indicados en la Tabla 3.

$$At = \text{Nivel} * \frac{(20 - 4)}{(500 - 0)} + 4 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$At = 10\text{cm} * \frac{(20 - 4)\text{mA}}{(500 - 0)\text{cm}} + 4\text{mA} = 4,32 \text{ mA}$$

Partiendo del tanque vacío se mide la señal de salida del sensor, el cual posee un valor de 4 mA; luego, se procede con el ingreso de 880 ml de agua, equivalente a 5 cm de altura donde se consigue una medición de 4,2 mA en el sensor. Como siguiente paso se sigue llenando el agua hasta una altura de 10, 15, 20 y así sucesivamente a pasos de 5 cm hasta completar los 70 cm, obteniendo diversos valores medidos Va detallados en la Tabla 4.

**Tabla 4**

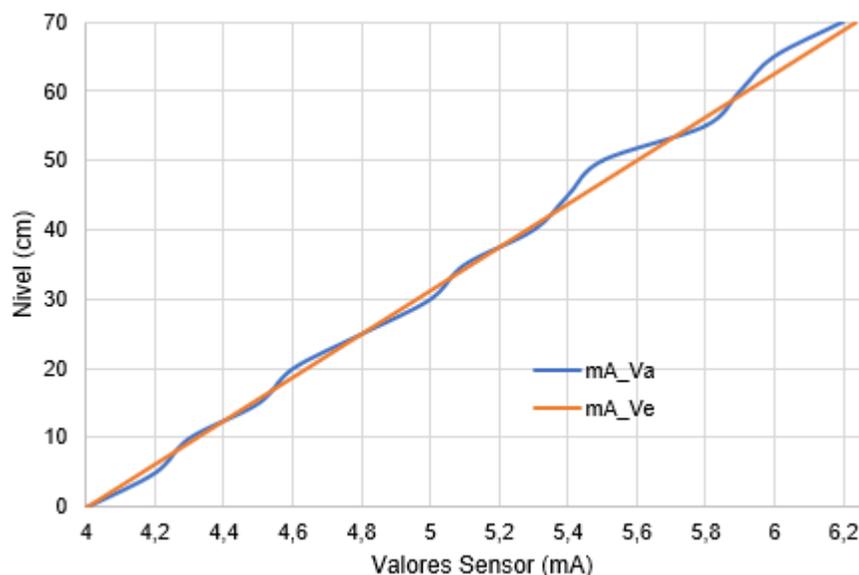
*Mediciones de la altura del tanque con el sensor EAMPPT1-136*

Volumen del tanque (Its)	Nivel (cm)	Datos (mA)		Er (%)	Volumen del tanque (Its)	Nivel (cm)	Datos (mA)		Er (%)
		Exacto Ve	Medido Va				Exacto Ve	Medido Va	
0	0	4	4	0	7,07	40	5,28	5,3	-0,4
0,88	5	4,16	4,2	-1	7,95	45	5,44	5,4	0,7
1,77	10	4,32	4,3	0,5	8,84	50	5,6	5,5	1,8
2,65	15	4,48	4,5	-0,4	9,72	55	5,76	5,8	-0,7
3,53	20	4,64	4,6	0,9	10,60	60	5,92	5,9	0,3
4,42	25	4,8	4,8	0,0	11,49	65	6,08	6	1,3
5,30	30	4,96	5	-0,8	12,37	70	6,24	6,2	0,6
6,19	35	5,12	5,1	0,4					

En la Figura 22 se muestra el nivel del tanque en función de los valores de amperaje medidos y exactos del sensor EAMPPT-136.

**Figura 20**

*Valores de nivel exactos y medidos el sensor EAMPPT-136*



Por consiguiente, se calcula el error  $E_r$  que existe entre los valores teóricos o exactos  $V_e$  y medidos  $V_a$ , empleando la Ecuación 6. Por ejemplo, si se toma un nivel de 10 cm equivalente a un  $V_e$  igual a 4,32 y se tiene una medida  $V_a$  de 4,3; se obtiene un error del 0,5%.

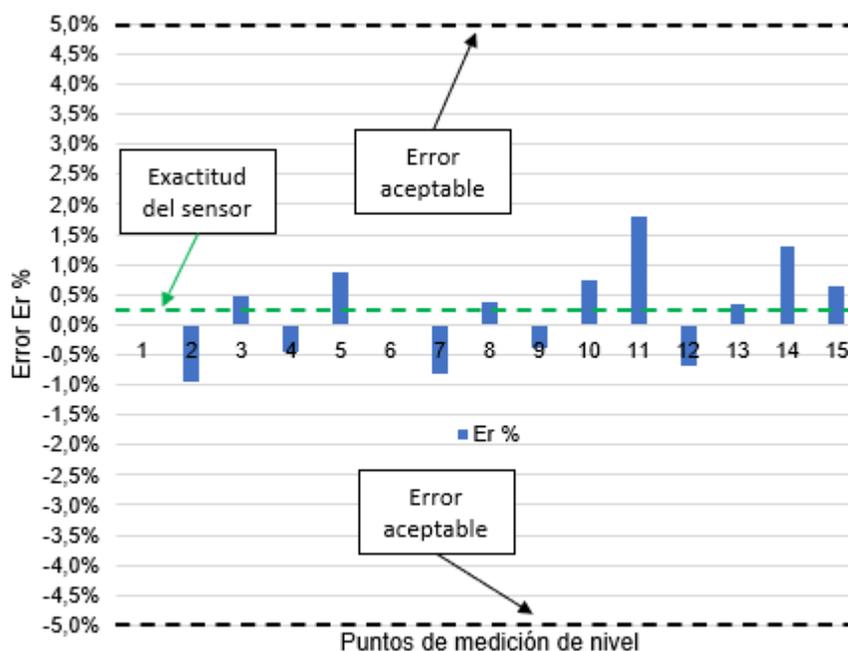
$$\text{Error relativo } E_r = \frac{V_e - V_a}{V_e} * 100\% \quad \text{Ecuación 6}$$

$$E_r = \frac{4,32 - 4,3}{4,32} * 100\% = 0,5\%$$

De la Tabla 3 se consideraron 15 puntos de medición del nivel para visualizar los errores porcentuales en la Figura 23 de las pruebas realizadas. Debido a los cambios bruscos durante el llenado de agua en el tanque, en la mayoría mediciones se alejan del 0,2 % de exactitud del sensor EAMPPT-136 a una altura de 5, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 y 70 centímetros en un 1.2, -0.3, 0.6, -0.7, 1.0, -0.2, 0.6, -0.5, -1.6, 0.9, -0.1, -1.1, -0.4 %; respectivamente. Sin embargo, se observa que los errores porcentuales no superan el  $\pm 2$  %, siendo el valor tolerable no mayor al  $\pm 5$  % (ver criterio de estabilidad del Apartado 5.2).

### Figura 21

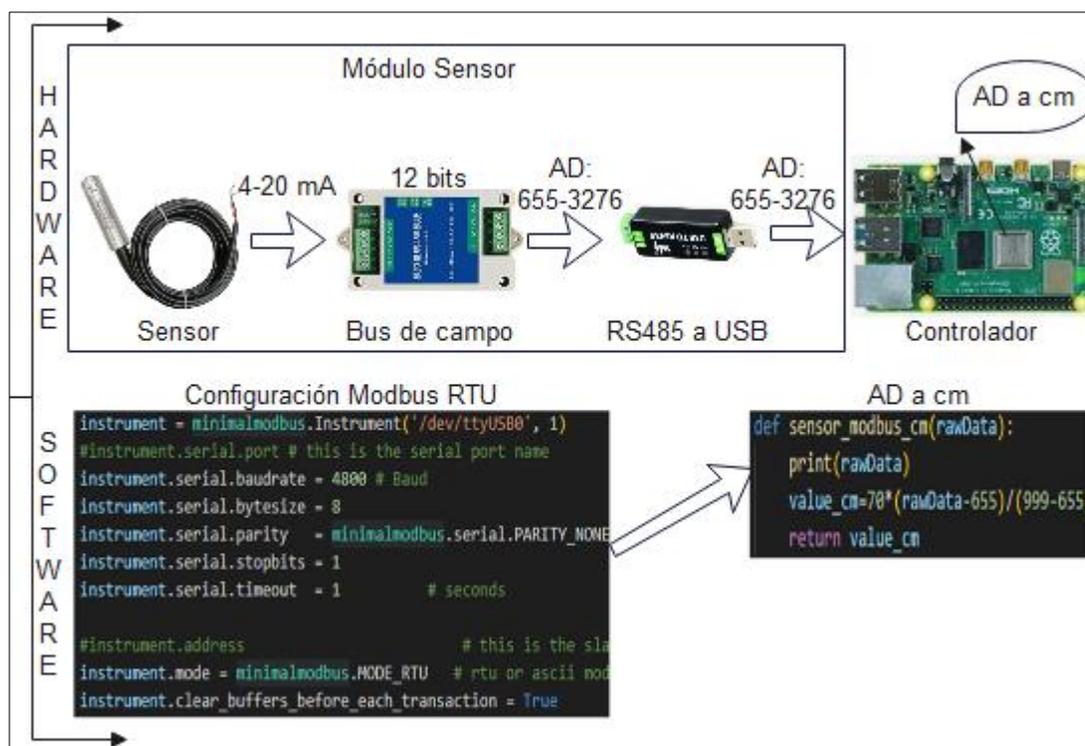
*Errores de medición en el sensor EAMPPT-136*



Una vez realizada la prueba del sensor, se procede con la conexión física (hardware) al bus de campo Taidacent AD multicanal y convertidor Waveshare (RS485 a USB) con el propósito de obtener los datos medidos AD del módulo sensor; posteriormente, se aplica la Ecuación 8 para llevar a cabo la conversión al nivel del tanque dado en centímetros. El dispositivo Taidacent emplea el protocolo de comunicación Modbus-RTU, el cual se configura por software, es decir, a través de la Raspberry Pi 4 modelo B, por lo que se utiliza el puerto serie USB0; luego, se coloca la dirección “minimalmodbus”, 8 bits de datos a una tasa de 4800 baudios, 0 bits de paridad, 1 bit de paro y 1 segundo de ejecución en el comando de puerto serial, tal como se indica en la Figura 24.

**Figura 22**

*Módulo sensor*



Como se conoce, el sensor EAMPPT-136 presenta una salida de 4 a 20mA cuyo rango de medición va desde 0 hasta 5 metros; luego, se coloca el módulo Taidacent AD multicanal cuya conexión de salida emplea el protocolo Modbus-RTU de interfaz RS485 para la carga de

los datos, estos expresados en su forma análoga digital AD que está en el rango entre 655 a 3276, tal como se indica en el catálogo técnico del Anexo 1. Para obtener los datos teóricos AD se emplea la Ecuación 7, tomando como referencia el rango de medición del sensor, es decir, que los 0 m representa un AD igual a 655 y su distancia máxima (5 m) posee un AD de 3276. Por ejemplo, se tiene un nivel de 10 cm y se obtiene un AD de 707.

$$AD = \text{Nivel} * \frac{(3276 - 655)}{(500 - 0)} + 655 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$AD = 10\text{cm} * \frac{(3276 - 655)}{(500 - 0)\text{cm}} + 655 = 707$$

Estos datos son comparados con los valores medidos y determinados por la Raspberry Pi, tal como se indica en la Tabla 5; obteniendo errores no mayores al 2,2 % en la toma de los datos. A partir de ello, se realiza diversas pruebas a pasos de 10 cm desde 0 a 70 cm, con el propósito de determinar el error porcentual que existen entre los valores exactos  $V_e$  y medidos  $V_a$  de los datos del módulo sensor.

**Tabla 5**

*Mediciones AD de la altura del tanque con el módulo sensor*

Nivel (cm)	Valores de los datos AD		Er (%)
	Exacto $V_e$	Medido $V_a$	
0	655	655	0
10	707	694	1,9
20	760	748	1,6
30	812	800	1,5
40	865	850	1,7
50	917	901	1,8
60	970	954	1,6
70	1022	999	2,2

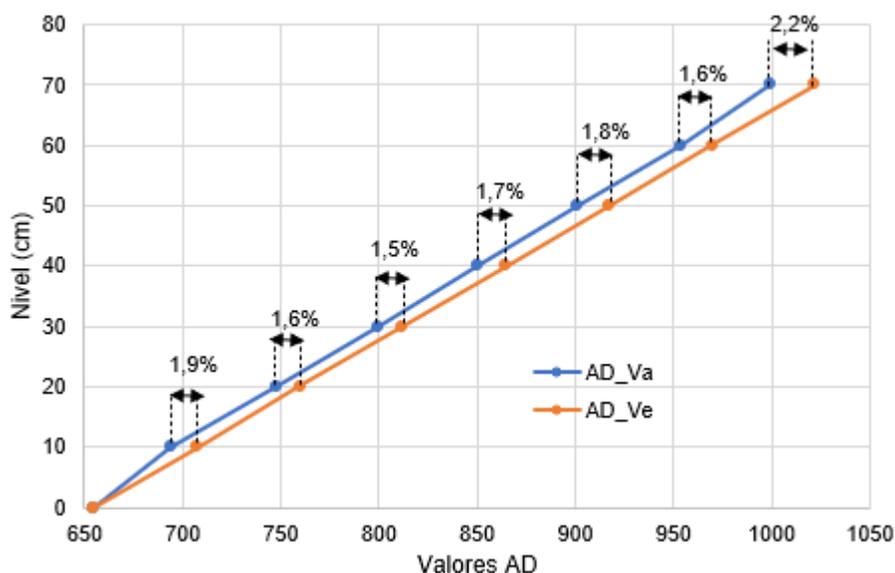
Por ejemplo, si se toma nivel de 20 cm, equivalente a un  $V_e$  igual a 760 y un valor  $V_a$  de 748, presenta un error del 1,6%.

$$E_r = \frac{760 - 748}{760} * 100\% = 1,6\%$$

Por consiguiente, en la Figura 23 se observa los cambios de error porcentual que existen a cierta altura del tanque.

### Figura 23

*Valores de nivel del tanque con el módulo sensor propuesto*



A pesar de que los valores  $V_a$  y  $V_e$  presentan un error porcentual bajo, esto se debe a dos factores: el 0,2 % de exactitud en el sensor EAMPPT-136 y a pequeñas perturbaciones internas como el ruido debido a la conexión entre los dispositivos. Por último, se aplica una conversión de los valores AD medidos a la altura del tanque expresada en centímetros, tal como se indica en la Ecuación 8.

$$\text{Nivel} = \frac{70(\text{AD} - 655)}{999 - 655} [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 8}$$

Por ejemplo, para un nivel de tanque de 30 cm se tiene una medición AD “AD = 800”, por tanto, se obtiene un valor de nivel igual a 29,5 cm.

$$\text{Nivel} = 70\text{cm} * \frac{AD - 655}{999 - 655} = 70\text{cm} * \frac{800 - 655}{999 - 655} = 29,5 \text{ cm}$$

### Validación en la planta de nivel

El funcionamiento de la planta de nivel se valida a través de las mismas experimentaciones de la tesis propuesta por los tesisistas Cuadrado Comina y González Bravo (2022, pág. 90), es decir, opera en el modo automático con el uso de los controladores PID, Fuzzy I y II a diferentes niveles SP definidos en la Tabla 6 y se define el error en estado estable  $E_{ss}$  considerando una tolerancia permitida del  $\pm 5\%$ . Por ejemplo, cuando se tiene un SP de 40 cm se obtiene un  $E_{ss}$  de  $\pm 2$  cm, equivalente a  $\pm 20$  mm.

**Tabla 6**

*Tolerancia permitida de nivel del tanque*

SP (cm)	PV mínimo (cm)	PV máximo (cm)	Tolerancia permitida	
			(mm)	%
30	28,50	31,50	$\pm 15,0$	$\pm 5$
40	38,00	42,00	$\pm 20,0$	$\pm 5$
25	23,75	26,25	$\pm 12,5$	$\pm 5$
40	38,00	42,00	$\pm 20,0$	$\pm 5$
30	28,50	31,50	$\pm 15,0$	$\pm 5$
38	36,10	39,90	$\pm 19,0$	$\pm 5$

### ***Pruebas con el controlador PID***

Una vez configurado el sensor EAMPPT-136 y controlador PID en la interfaz HMI, se realizan las pruebas relacionadas en la tesis previa. Para ello, se selecciona los mismos SP como se define en la Tabla 7, donde se obtiene el tiempo de establecimiento  $T_s$  y el error en

estado estable Ess siendo este un valor de nivel no superior al  $\pm 5\%$  para que la planta opere adecuadamente.

**Tabla 7**

*Error Ess y tiempo Ts bajo la operación del controlador PID*

SP (cm)	$\Delta t$ (s)	Tesis previa			Tesis actual		
		Ess (mm)	Ess (%)	Ts (s)	Ess (mm)	Ess (%)	Ts (s)
30	0 – 120	$\pm 11,3$	$\pm 3,8$ ✓	63,56	$\pm 13,1$	$\pm 4,4$ ✓	67,19
40	120 – 210	$\pm 8,2$	$\pm 2,1$ ✓	32,93	$\pm 15,4$	$\pm 3,9$ ✓	8,30
25	210 – 300	$\pm 7,7$	$\pm 3,1$ ✓	10,35	$\pm 11,9$	$\pm 4,8$ ✓	10,54
40	300 – 390	$\pm 18,6$	$\pm 4,6$ ✓	9,74	$\pm 15,4$	$\pm 3,9$ ✓	8,68
30	390 – 480	$\pm 14,4$	$\pm 4,8$ ✓	6,68	$\pm 5,2$	$\pm 1,7$ ✓	7,85
38	480 – 570	$\pm 14,0$	$\pm 3,7$ ✓	7,18	$\pm 15,8$	$\pm 4,1$ ✓	8,01

Pese a que los Ess presentan diferentes valores ya sea con el uso del sensor actual o el anterior, este opera dentro del criterio de estabilidad permitido. En cuanto, se refiere a los tiempos Ts, la tesis actual presenta un mejor tiempo Ts cuando el SP está situado en 40 cm la primera vez, mientras que para el resto de los valores SP poseen tiempos cercanos con una diferencia no mayor a los 4 segundos.

Una vez realizada las pruebas, se va a tomar una muestra del total para la validación de los datos, donde se definen 31 de los 3232 valores PV en la Tabla 8 y el número total de PV se encuentra en el Anexo 2.

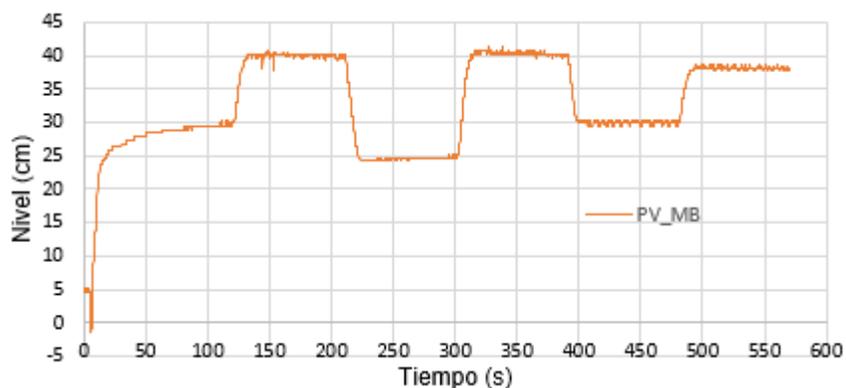
**Tabla 8***Datos PV con el controlador PID*

<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>	<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>
	<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>		<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>
0	2,84883721	5,0257732	48	27,6744186	27,8350515
3	2,44186047	4,76804124	51	27,6744186	28,3505155
6	5,0872093	-1,41752577	54	28,0813953	28,3505155
9	14,244186	11,9845361	57	28,0813953	28,3505155
12	21,1627907	21,1340206	60	28,2848837	28,3505155
15	23,6046512	23,7113402	63	28,2848837	28,3505155
18	24,8255814	24,742268	66	28,4883721	28,8659794
21	25,4360465	25,7731959	69	28,6918605	28,8659794
24	25,6395349	26,2886598	72	28,6918605	28,8659794
27	26,0465116	26,2886598	75	28,8953488	28,8659794
30	26,25	26,2886598	78	28,8953488	28,8659794
33	26,4534884	26,8041237	81	28,8953488	29,3814433
36	26,6569767	27,3195876	84	29,3023256	28,8659794
39	27,0639535	27,3195876	87	28,8953488	28,8659794
42	27,2674419	27,8350515	90	29,3023256	29,3814433
45	27,4709302	27,8350515	.....	.....	.....

En la Figura 24 se denota la respuesta del sistema de la tesis previa, en la cual presenta errores de medición en el periodo de tiempo de 0 a 6 s debido a que muestra una altura del tanque de 5 cm y luego, decae a valores negativos donde se considera datos de medición no válidas. Pasado ese lapso hasta los 120 s se observa como la respuesta del sistema alcanza el estado estable para un SP de 30 cm. Por consiguiente, se modifica el SP para visualizar el comportamiento de la planta; por ejemplo, para un SP de 40 cm se muestra como en ciertos intervalos de tiempo (130-210 s y 310-370 s) presentan altos picos PV, los cuales pueden perjudicar al proceso de la planta.

### Figura 24

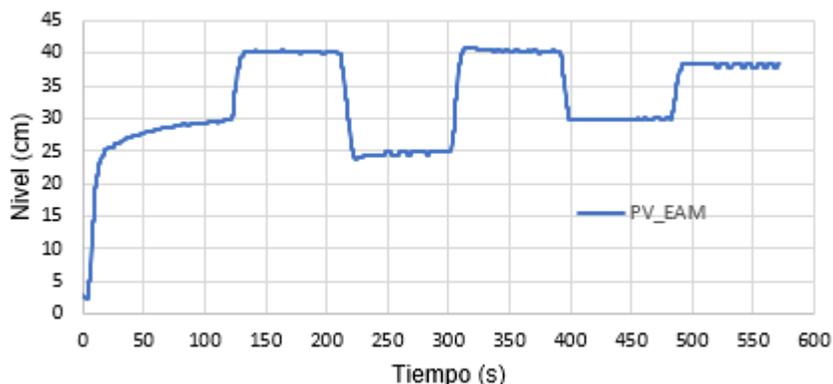
*Respuesta con el controlador PID y sensor anterior*



En cambio, a través de la Figura 25 se exhibe como el sensor actual mejora la señal de respuesta PV del sistema ya que primero permite dar una lectura positiva en la altura del tanque durante todo el proceso de la planta entre 0 a 570 s y segundo, se muestra la disminución en la cantidad de picos PV a ciertos SP por lo que la señal es más estable.

**Figura 25**

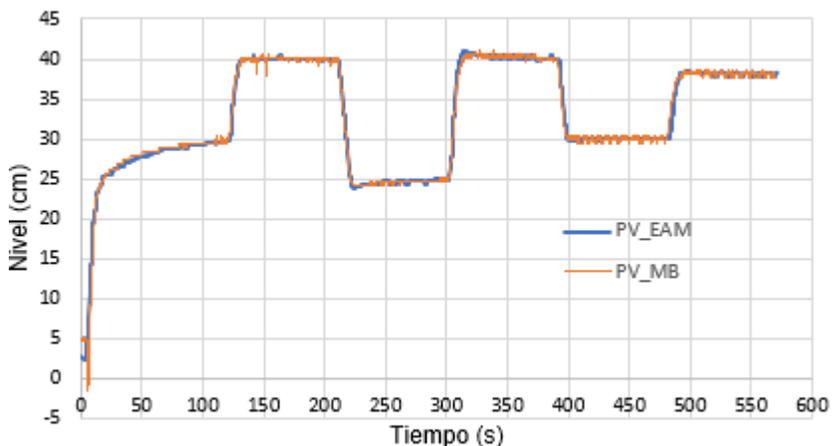
*Respuesta con el controlador PID y sensor actual*



En la Figura 26 se observa la respuesta de nivel PV del sistema de la tesis actual con respecto a la previa, verificando de forma gráfica que de la salida se tiene datos fiables y sin errores el cual permite un adecuado análisis.

**Figura 26**

*Respuesta con el controlador PID*

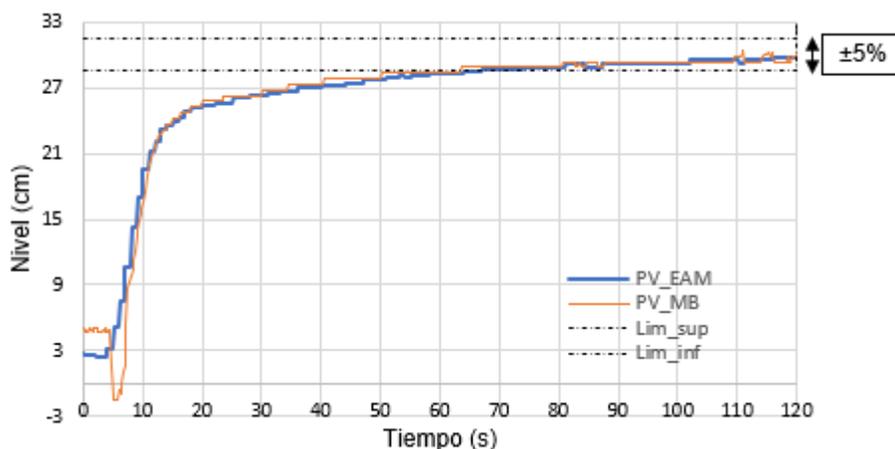


La prueba PID se realiza a una altura de 2,8 cm en el tiempo 0 s, puesto que no se descargó completamente el líquido del tanque de las pruebas antes mencionadas en el Apartado 5.2.1. Por consiguiente, se desarrolla la prueba con el sensor anterior a  $t=0$  s cuya medición está en los 5 cm visto en la Figura 27; en ese caso existe una mala precisión de los datos ya que presenta un error de 2,2 cm. Luego, se observa como decae la señal PV en el

tanque de la tesis previa a valores negativos de -1,4 cm en el intervalo de 5 a 6 s, por lo que se considera una medición no válida. Pasado ese lapso comienza a incrementar su valor PV hasta alcanzar medidas cercanas a los 30 cm siendo la estabilidad ( $\pm 3,8\%$ ) no superior al  $\pm 5\%$  aún en presencia de picos de magnitud PV en el periodo entre 110 a 120 s. En cambio, con el sensor actual se observa el mejoramiento de la señal de respuesta de 0 a 120 s, debido a que no presenta mediciones erróneas como los valores negativos del anterior sensor y que durante el funcionamiento muestra una mejor señal de salida, obteniendo un Ess de  $\pm 4,4\%$  y un Ts igual a 67,19 segundos.

### Figura 27

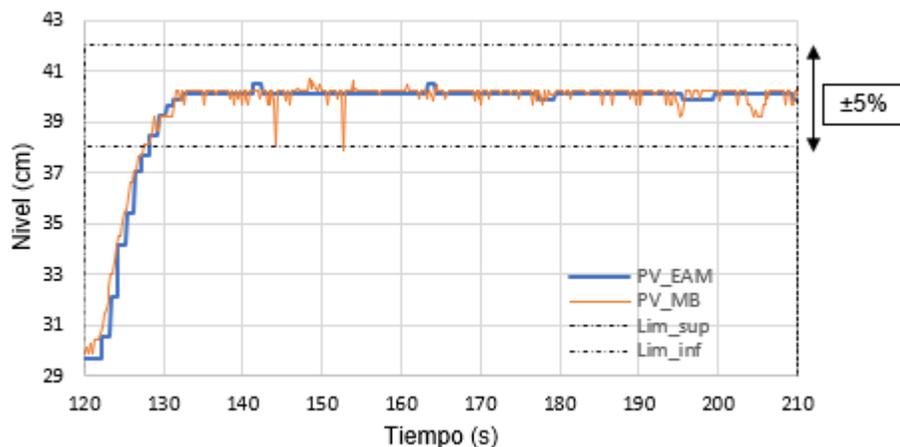
*Respuesta con PID de 0 a 120 s*



En la Figura 28 se indica que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior ostenta un transitorio similar al actual de 120 a 128 s. Pasado ese lapso hasta los 152 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta altos picos de magnitud PV superando el  $\pm 5\%$  de Ess. Luego, la planta de nivel se estabiliza a los 32,93 s con un Ess de  $\pm 2,1\%$  aun estando presente en menor proporción los picos PV. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 120 a 210 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que tiene una estabilidad no mayor al  $\pm 3,9\%$  y un Ts igual a 8,30 s.

**Figura 28**

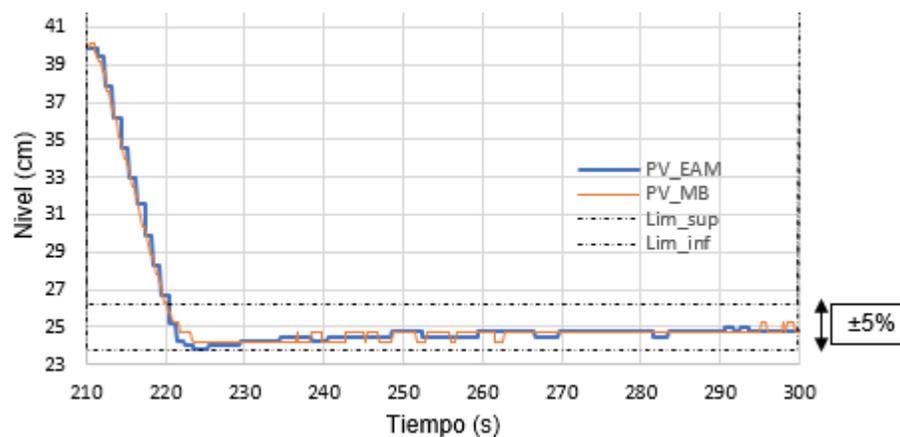
*Respuesta con PID de 120 a 210 s*



En la Figura 29 se muestra como la respuesta PV del sistema despliega una rapidez similar en el transitorio y buena estabilidad menor al  $\pm 5\%$  ya sea con el sensor actual ( $E_{ss} = \pm 4,8\%$  y  $T_s = 10,54$  s) o el anterior ( $E_{ss} = \pm 3,1\%$  y  $T_s = 10,54$  s) en el intervalo de 210 a 300 s.

**Figura 29**

*Respuesta con PID de 210 a 300 s*

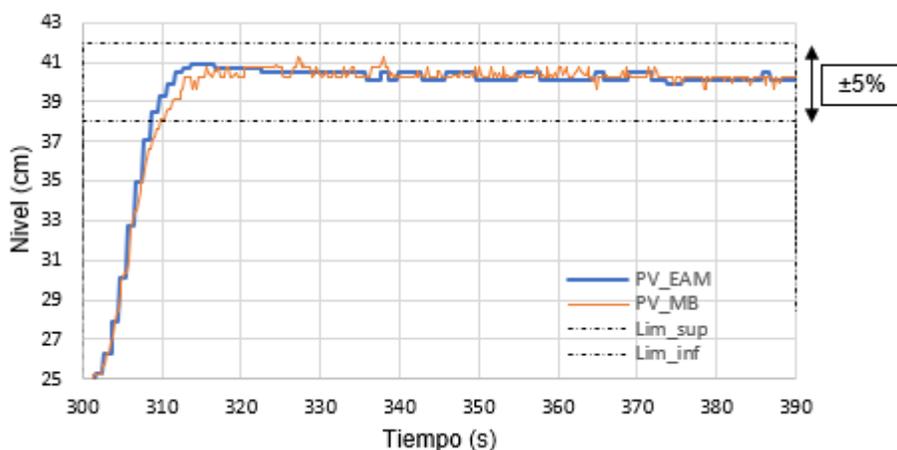


En la Figura 30 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior presenta un transitorio mayor al actual de 300 a 308 s. Pasado ese lapso hasta los 390 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que

posee un valor Ess igual a  $\pm 4,6\%$  y se estabiliza a los 9,74 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 300 a 390 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor al  $\pm 3,9\%$  y un Ts igual a 8,30 s.

### Figura 30

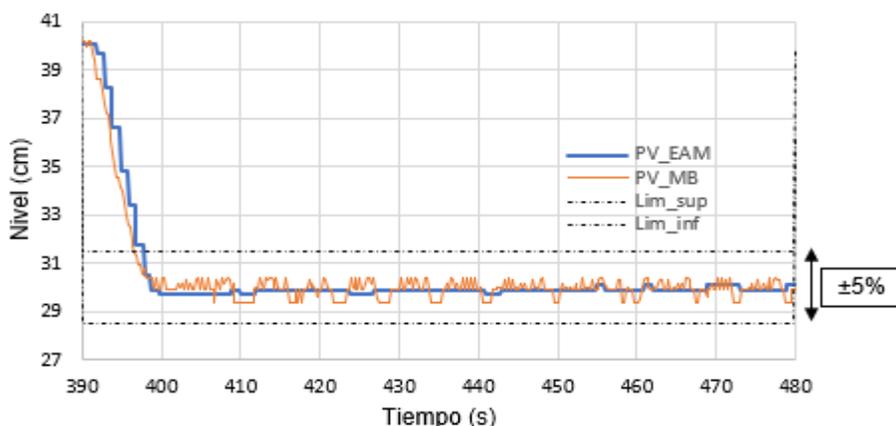
*Respuesta con PID de 300 a 390 s*



En la Figura 31 se visualiza que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior exhibe señales un transitorio similar al actual de 390 a 396 s. Pasado ese lapso hasta los 480 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor Ess igual a  $\pm 4,8\%$  y se estabiliza a los 6,68 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 300 a 390 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor al  $\pm 1,7\%$  y un Ts igual a 7,85 s.

**Figura 31**

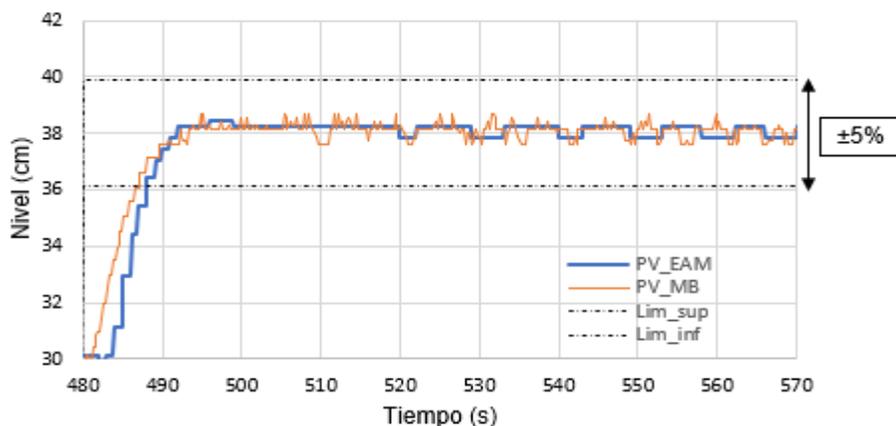
*Respuesta con PID de 390 a 480 s*



En la Figura 32 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior manifiesta un tiempo transitorio menor al actual en el intervalo de 480 a 487 s. Pasado ese lapso hasta los 570 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor Ess igual a  $\pm 3,7\%$  y se estabiliza a los 7,18 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 480 a 570 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor al  $\pm 4,1\%$  y un Ts igual a 8,01 s.

**Figura 32**

*Respuesta con PID de 480 a 570 s*



Una vez analizada la respuesta de nivel PV dentro de los rangos antes mencionados, se demuestra que el sensor actual ofrece mejores características al anterior ya que realiza mediciones de 0 a 40 cm. Además, presenta una señal de salida más estable.

### ***Pruebas con el controlador Fuzzy I***

Una vez configurado el sensor EAMPPT-136 y controlador Fuzzy I en la interfaz HMI, se realizan las pruebas relacionadas con la tesis previa. Para ello, se utiliza diversos SP vistos en la Tabla 9, donde se obtiene el tiempo de establecimiento  $T_s$  y el error en estado estable  $Ess$  siendo este un valor de nivel no superior al  $\pm 5\%$  para que la planta opere adecuadamente.

**Tabla 9**

*Error Ess y tiempo  $T_s$  bajo la operación del controlador Fuzzy I*

SP (cm)	$\Delta t$ (s)	Tesis previa			Tesis actual				
		Ess (mm)	Ess (%)	$T_s$ (s)	Ess (mm)	Ess (%)	$T_s$ (s)		
30	0 – 120	$\pm 11,3$	$\pm 3,8$	✓	36,83	$\pm 11$	$\pm 3,7$	✓	17,27
40	120 – 210	$\pm 18,6$	$\pm 4,6$	✓	7,62	$\pm 13,4$	$\pm 3,3$	✓	7,43
25	210 – 300	$\pm 7,7$	$\pm 3,1$	✓	29,30	$\pm 11,9$	$\pm 4,8$	✓	20,64
40	300 – 390	$\pm 18,6$	$\pm 4,6$	✓	9,11	$\pm 17,2$	$\pm 2,3$	✓	9,83
30	390 – 480	$\pm 14,4$	$\pm 4,8$	✓	6,45	$\pm 11$	$\pm 3,7$	✓	8,01
38	480 – 570	$\pm 14,0$	$\pm 3,7$	✓	7,57	$\pm 17,8$	$\pm 4,7$	✓	7,06

Pese a que los Ess presenta diferentes valores en el sistema ya sea con el uso del sensor actual o el anterior, este opera dentro de la estabilidad permitida. En cuanto, se refiere a los tiempos  $T_s$ , la tesis actual presenta un mejor tiempo  $T_s$  cuando el SP está situado en 30 cm la primera vez y a los 25 cm de altura, mientras que para el resto de los valores SP poseen

tiempos  $T_s$  cercanos con una diferencia no mayor a los 2 segundos. Una vez realizada las pruebas, se va a tomar una muestra del total para la validación de los datos, donde se definen 31 de los 3232 valores PV en la Tabla 10 y el número total de PV se encuentra en el Anexo 2.

**Tabla 10**

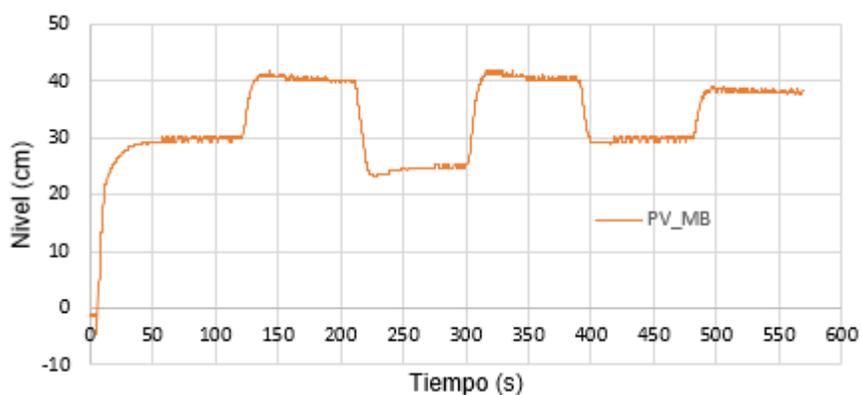
*Datos PV con el controlador Fuzzy I*

<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>	<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>
	<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>		<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>
0	0	-1,15979381	48	30,1162791	29,3814433
3	0	-1,03092784	51	30,1162791	29,3814433
6	0,40697674	-2,70618557	54	30,1162791	29,3814433
9	8,54651163	12,8865979	57	29,9127907	29,8969072
12	20,5523256	20,6185567	60	30,1162791	29,3814433
15	26,4534884	23,7113402	63	29,9127907	29,3814433
18	28,8953488	25,257732	66	30,1162791	30,4123711
21	29,7093023	25,7731959	69	30,1162791	29,3814433
24	30,1162791	26,8041237	72	29,9127907	29,8969072
27	30,3197674	27,3195876	75	29,9127907	29,3814433
30	30,1162791	27,8350515	78	30,1162791	29,3814433
33	30,1162791	28,3505155	81	29,9127907	30,1546392
36	30,3197674	28,8659794	84	30,1162791	29,8969072
39	30,1162791	28,8659794	87	29,9127907	29,8969072
42	30,1162791	29,3814433	90	29,9127907	29,8969072
45	30,1162791	28,8659794	.....	.....	.....

En la Figura 33 se denota la respuesta del sistema de la tesis previa, en la cual presenta errores de medición en el periodo de tiempo de 0 a 6 s debido a que muestra valores negativos en la altura del tanque por lo que se considera datos de medición no válidos. Pasado ese lapso hasta los 120 s se observa como la respuesta del sistema alcanza el estado estable para un SP de 30 cm. Por consiguiente, se modifica el SP para visualizar el comportamiento de la planta; por ejemplo, para un SP de 40 cm se muestra como en ciertos intervalos de tiempo (140-190 s y 320-390 s) presentan altos picos PV, los cuales pueden perjudicar al proceso de la planta.

### Figura 33

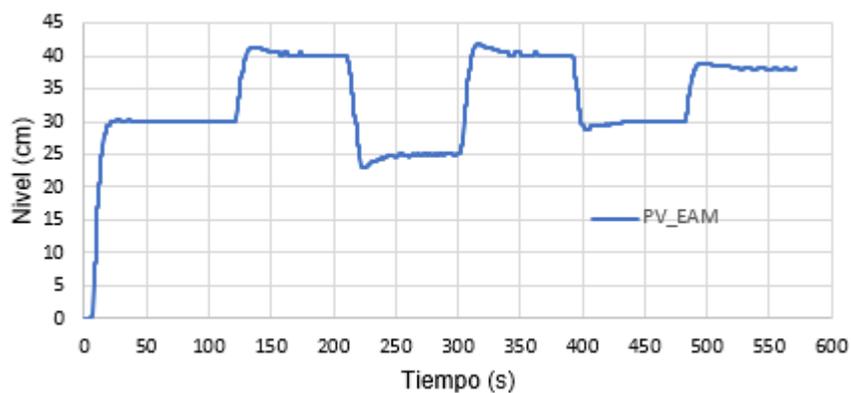
*Respuesta con el controlador Fuzzy I y sensor anterior*



En cambio, a través de la Figura 34 se observa como el sensor actual mejora la señal de respuesta PV del sistema ya que primero permite dar una lectura positiva en la altura del tanque durante todo el proceso de la planta entre 0 a 570 s y segundo se muestra la disminución en la cantidad de picos PV a ciertos SP por lo que la señal es más estable.

**Figura 34**

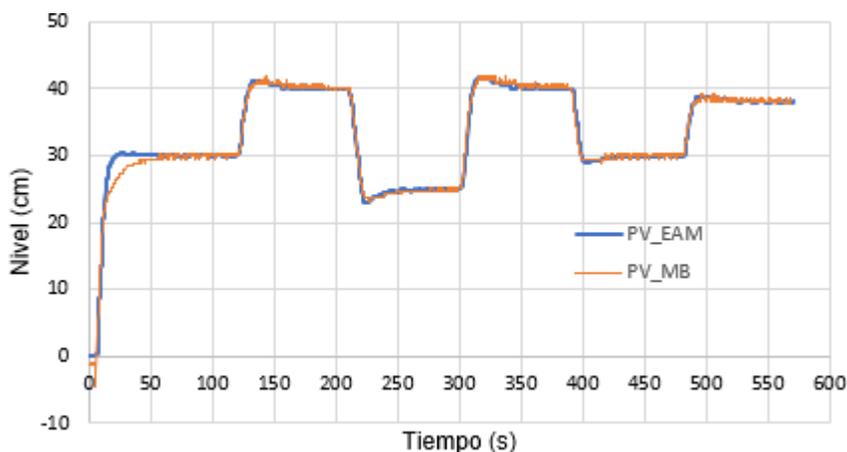
*Respuesta con el controlador Fuzzy I y sensor actual*



En la Figura 35 se observa la respuesta de nivel PV del sistema de la tesis actual con respecto a la previa, verificando de forma gráfica que de la salida se tiene datos fiables y sin errores el cual permite un análisis apropiado.

**Figura 35**

*Respuesta con el controlador Fuzzy I*

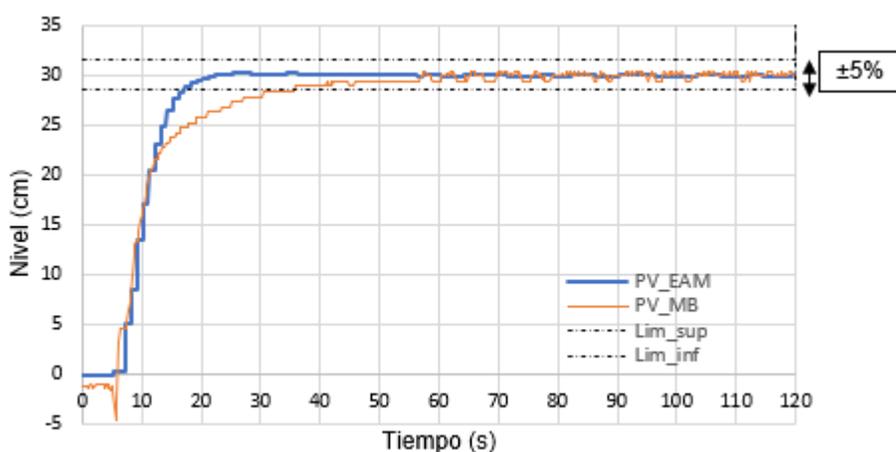


La prueba Fuzzy I se realiza con una altura de 0 cm en el tiempo 0 s; por lo que se obtiene con el sensor anterior una medición de -1,1 cm y mantiene valores negativos e incluso decae a los 5,6 s con una altura de -4,6 cm tal como se indica en la Figura 36; en ese caso se consideran que los datos no son válidos. Pasado ese lapso comienza a incrementar su valor PV a pasos lentos ( $T_s = 36,83$  s) hasta alcanzar medidas cercanas a los 30 cm siendo la

estabilidad ( $\pm 3,8\%$ ) no superior a  $\pm 5\%$  aún en presencia de picos de magnitud PV en el intervalo entre 60 a 120 s. En cambio, con el sensor actual se observa el mejoramiento de la señal de respuesta de 0 a 120 s, debido a que no presenta mediciones erróneas como los valores negativos del anterior sensor y que durante el funcionamiento muestra una mejor señal de salida, obteniendo un  $Ess = \pm 3,7\%$  y  $Ts$  de 17,27 s.

### Figura 36

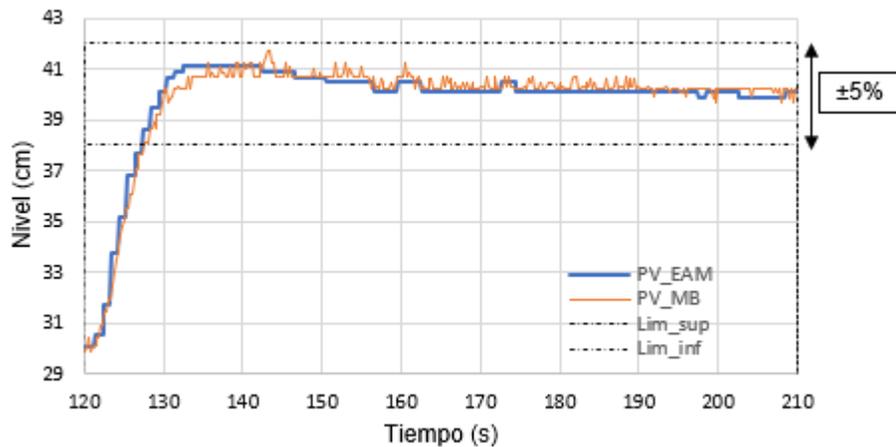
*Respuesta con Fuzzy I de 0 a 120 s*



En la Figura 37 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior muestra un transitorio similar al actual de 120 a 127 s. Pasado ese lapso hasta los 190 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor  $Ess$  igual a  $\pm 4,6\%$  y se estabiliza a los 7,62 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 120 a 210 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor al  $\pm 3,3\%$  y un  $Ts$  igual a 7,43 s.

**Figura 37**

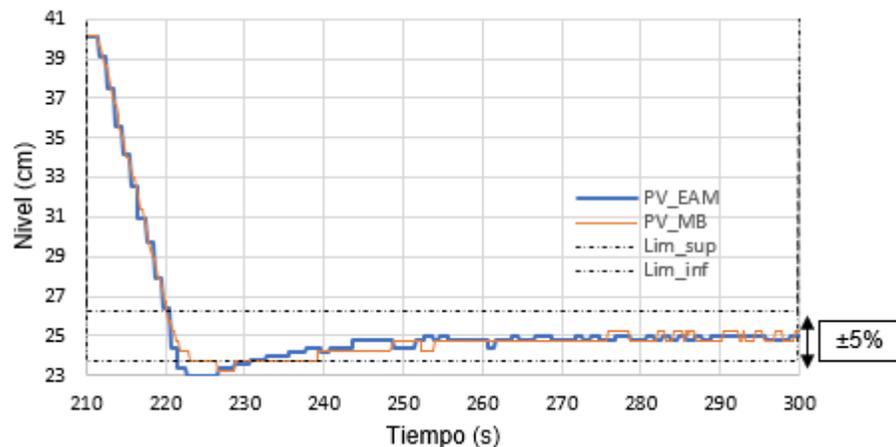
*Respuesta con Fuzzy I de 120 a 210 s*



En la Figura 38 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior indica un transitorio similar al actual de 210 a 221 s. Luego, decae un poco la señal de respuesta, aumentando el tiempo transitorio hasta obtener un  $T_s$  igual a 29,30 s con un  $E_{ss}$  de  $\pm 3,1\%$  en el intervalo de 210 a 300 s. En cambio, con el sensor actual se muestra la señal decae aún más en el tiempo de 225 s; sin embargo, presenta una rapidez en el transitorio con lo que se obtiene un  $T_s$  igual a 20,64 segundos y una estabilidad no mayor a  $\pm 4,8\%$ .

**Figura 38**

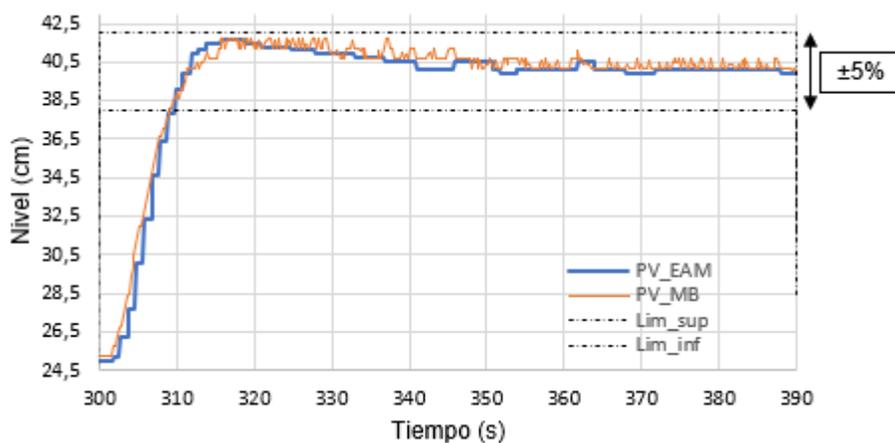
*Respuesta con Fuzzy I de 210 a 300 s*



En la Figura 39 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior señala un transitorio similar al actual de 300 a 309 s. Pasado ese lapso hasta los 390 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor Ess igual a  $\pm 4,6\%$  y se estabiliza a los 9,11 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 300 a 390 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor a  $\pm 2,3\%$  y un Ts igual a 9,83 s.

### Figura 39

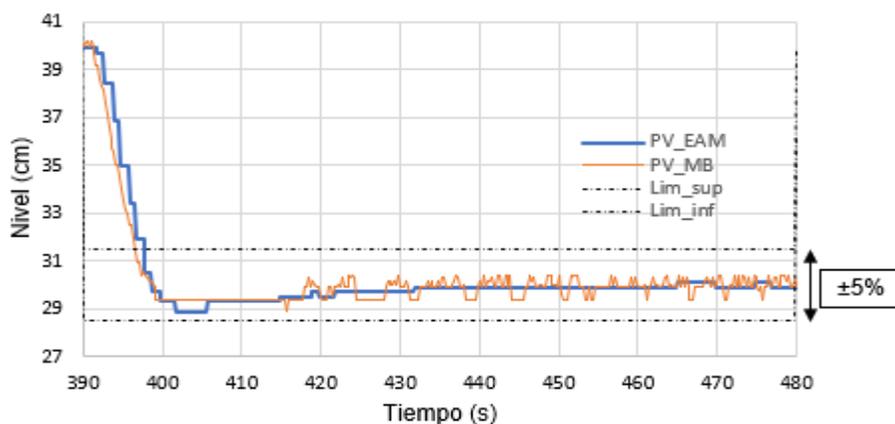
*Respuesta con Fuzzy I de 300 a 390 s*



En la Figura 40 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior demuestra un transitorio menor al actual de 390 a 396 s. Pasado ese lapso hasta los 390 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor Ess igual a  $\pm 4,8\%$  y se estabiliza a los 6,45 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 390 a 480 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor a  $\pm 3,7\%$  y un Ts igual a 8,01 s.

**Figura 40**

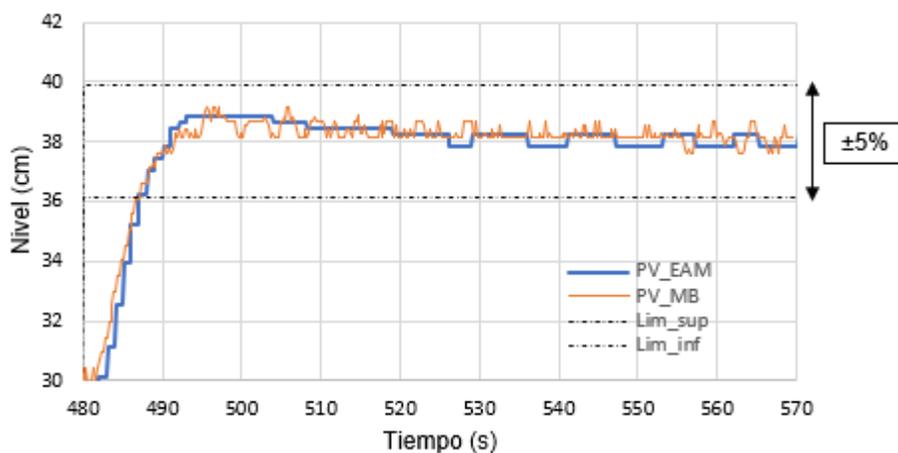
*Respuesta con Fuzzy I de 390 a 480 s*



En la Figura 41 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior expone un transitorio similar al actual de 480 a 487 s. Pasado ese lapso hasta los 390 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor  $E_{ss}$  igual a  $\pm 3,7\%$  y se estabiliza a los 7,57 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 480 a 570 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor a  $\pm 4,7\%$  y un  $T_s$  igual a 7,06 s.

**Figura 41**

*Respuesta con Fuzzy I de 480 a 570 s*



Una vez analizada la respuesta de nivel PV dentro de los rangos antes mencionados, se demuestra que el sensor actual ofrece mejores prestaciones al anterior ya que realiza mediciones de 0 a 40 cm. Además, presenta una señal de salida más estable.

### ***Pruebas con el controlador Fuzzy II***

Una vez configurado el sensor EAMPPT-136 y controlador Fuzzy II en la interfaz HMI, se realizan las pruebas relacionadas con la tesis previa. Para ello, se selecciona diversos SP definidos en la Tabla 11, donde se obtiene el tiempo de establecimiento  $T_s$  y el error en estado estable  $E_{ss}$  siendo este un valor de nivel no superior al  $\pm 5\%$  para que la planta opere adecuadamente. Además, se considera un tiempo  $T_s$  máximo de 70 segundos para que el sistema tenga la capacidad de establecerse.

**Tabla 11**

*Error  $E_{ss}$  y tiempo  $T_s$  bajo la operación del controlador Fuzzy II*

SP (cm)	$\Delta t$ (s)	Tesis previa			Tesis actual				
		$E_{ss}$ (mm)	$E_{ss}$ (%)	$T_s$ (s)	$E_{ss}$ (mm)	$E_{ss}$ (%)	$T_s$ (s)		
30	0 – 120	No estable	> $\pm 5$	✗	No estable	$\pm 9,3$	$\pm 3,1$	✓	20,50
40	120 – 210	No estable	> $\pm 5$	✗	No estable	$\pm 15,4$	$\pm 3,9$	✓	6,54
25	210 – 300	No estable	> $\pm 5$	✗	No estable	+11,9	+4,8	✓	45,80
40	300 – 390	$\pm 18,6$	$\pm 4,6$	✓	8,36	$\pm 15,4$	$\pm 3,9$	✓	7,95
30	390 – 480	+12,6	+4,2	✓	31,80	+13,1	+4,4	✓	16,14
38	480 – 570	$\pm 15,3$	$\pm 4,0$	✓	8,56	$\pm 15,8$	$\pm 4,1$	✓	6,21

Cuando se emplea el sensor actual, se observa a través de la Tabla 11 que el sistema es estable durante los 570 segundos; mientras que no ocurre lo mismo con el sensor anterior, puesto que no logra estabilizarse durante los primeros 210 segundos. Pasado este intervalo de

tiempo ambos presentan magnitudes similares en el estado transitorio, a excepción del SP de 25 y 30 cm, donde se indica como los valores actuales son más rápidos que los anteriores. Una vez realizada las pruebas, se va a tomar una muestra del total para la validación de los datos, donde se definen 31 de los 3232 valores PV en la Tabla 12 y el número total de PV se encuentra en el Anexo 2.

**Tabla 12**

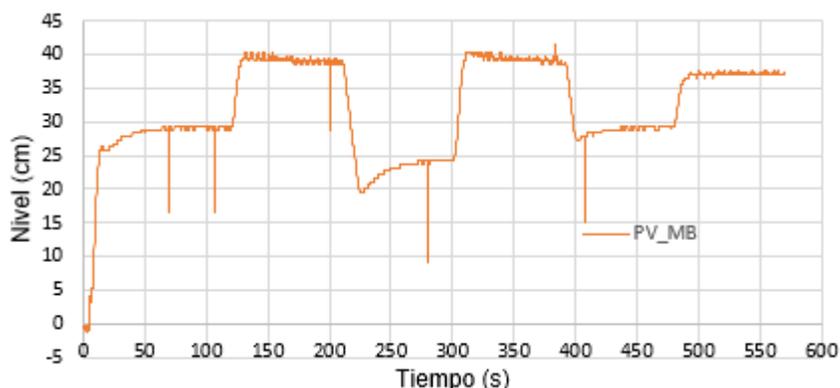
*Datos PV con el controlador Fuzzy II*

<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>	<b>T(s)</b>	<b>T. actual</b>	<b>T. previa</b>
	<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>		<b>PV (cm)</b>	<b>PV (cm)</b>
0	0	-0,51546392	48	29,7093023	28,8659794
3	0	-1,03092784	51	29,7093023	28,8659794
6	0,40697674	4,12371134	54	29,7093023	28,8659794
9	8,95348837	12,242268	57	29,7093023	28,8659794
12	23,1976744	23,1958763	60	29,7093023	28,8659794
15	31,5406977	26,2886598	63	29,505814	28,8659794
18	32,7616279	25,7731959	66	29,505814	29,3814433
21	30,9302326	26,2886598	69	29,505814	29,3814433
24	30,3197674	26,2886598	72	29,505814	28,8659794
27	30,3197674	26,8041237	75	29,7093023	29,3814433
30	30,3197674	27,3195876	78	29,505814	29,3814433
33	30,1162791	27,8350515	81	29,505814	29,3814433
36	30,1162791	27,8350515	84	29,505814	29,3814433
39	29,9127907	27,8350515	87	29,505814	29,3814433
42	29,7093023	28,3505155	90	29,505814	29,2525773
45	29,7093023	28,3505155	.....	.....	.....

En la Figura 42 se denota la respuesta del sistema de la tesis previa, en la cual presenta errores de medición en el periodo de tiempo de 0 a 3 s debido a que muestra valores negativos en la altura del tanque por lo que se considera datos de medición no válidas. Pasado ese lapso hasta los 120 s se observa como la respuesta del sistema alcanza el estado estable para un SP de 30 cm. Por consiguiente, se modifica el SP para visualizar el comportamiento de la planta; por ejemplo, para un SP de 40 cm se muestra como en ciertos intervalos de tiempo (130-210 s y 320-390 s) presentan altos picos PV, los cuales pueden perjudicar al proceso de la planta.

### Figura 42

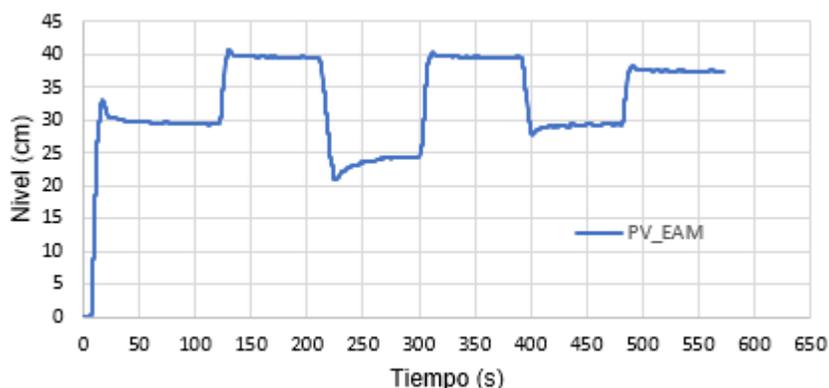
*Respuesta con el controlador Fuzzy II y sensor anterior*



En cambio, a través de la Figura 43 se observa como el sensor actual mejora la señal de respuesta PV del sistema ya que primero permite dar una lectura positiva en la altura del tanque durante todo el proceso de la planta entre 0 a 570 s y segundo se muestra la disminución en la cantidad de picos PV a ciertos SP por lo que la señal es más estable.

**Figura 43**

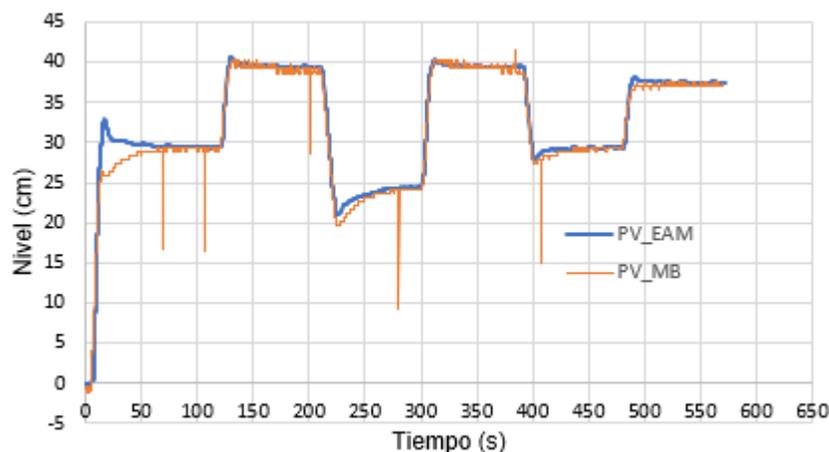
*Respuesta con el controlador Fuzzy II y sensor actual*



En la Figura 44 se observa la respuesta de nivel PV del sistema de la tesis actual con respecto a la previa, verificando de forma gráfica que de la salida se tiene datos fiables y sin errores el cual permite un análisis apropiado.

**Figura 44**

*Respuesta con el controlador Fuzzy II*

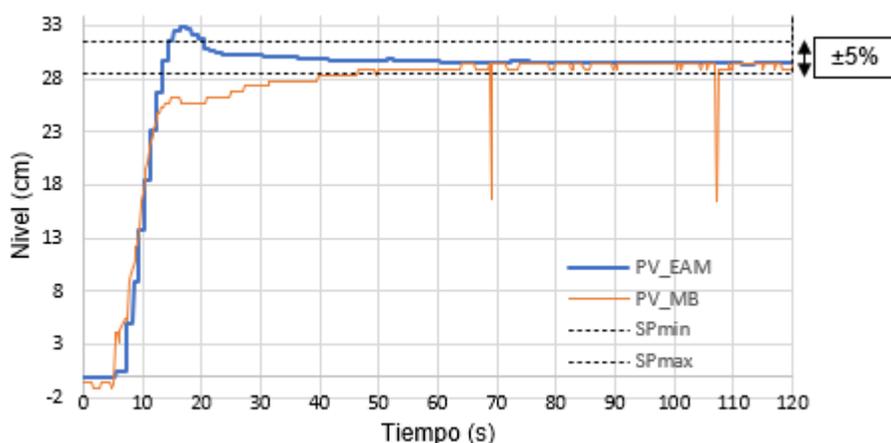


La prueba Fuzzy II se realiza con una altura de 0 cm en el tiempo 0 s; por lo que se obtiene con el sensor anterior una medición de -0,5 cm y mantiene valores negativos hasta los 5,1 s tal como se indica en la Figura 45, en ese caso se consideran que los datos no son válidos. Pasado ese lapso comienza a incrementar su valor PV a pasos lentos hasta alcanzar medidas cercanas a los 30 cm. Sin embargo, a los 69 y 107 s existen altos picos de magnitud

PV, los cuales superan la tolerancia permitida de  $\pm 5\%$  y provoca que no se estabilice la planta en el intervalo de 0 a 120 s. En cambio, con el sensor actual se observa el mejoramiento de la señal de respuesta de 0 a 120 s, debido a que no presenta mediciones erróneas como los valores negativos del anterior sensor y que durante el funcionamiento muestra una mejor señal de salida, obteniendo un Ess igual a  $\pm 3,1\%$  y Ts de 20,50 s.

### Figura 45

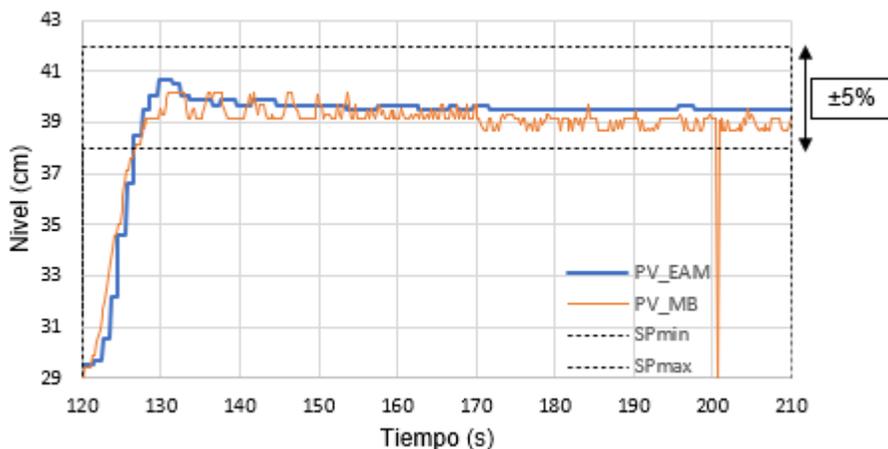
*Respuesta con Fuzzy II de 0 a 120 s*



En la Figura 46 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior manifiesta un transitorio similar al actual de 120 a 126 s. Pasado ese lapso hasta los 200 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta altos picos de magnitud PV debido a la pérdida de los datos, donde en el tiempo de 200 s supera el  $\pm 5\%$  de Ess y esto provoca que no se estabilice la planta. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 120 a 210 segundos, debido a la disminución de picos PV, por lo que tiene una estabilidad no mayor al  $\pm 3,9\%$  y un Ts igual a 6,54 s.

**Figura 46**

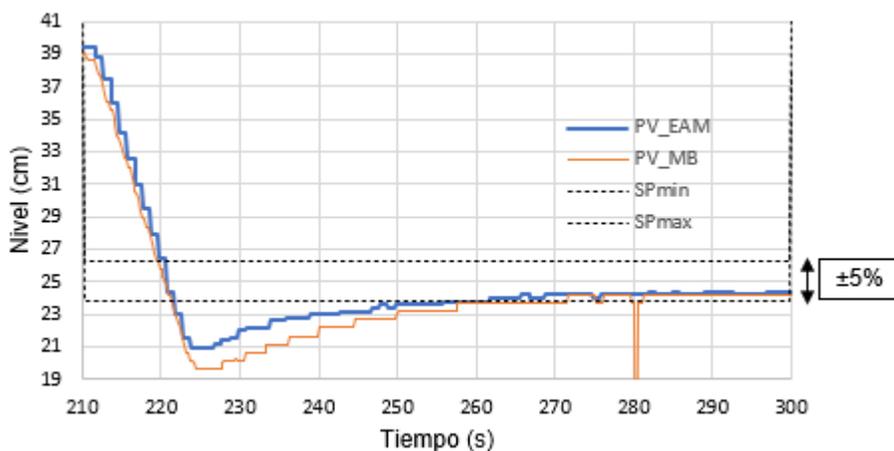
*Respuesta con Fuzzy II de 120 a 210 s*



En la Figura 47 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior exhibe un transitorio similar al actual de 210 a 221 s. Luego, decae la señal de respuesta, aumentando el tiempo transitorio y al tiempo de 280 segundos presenta un pico elevado de magnitud PV debido a la pérdida de los datos, el cual supera el  $\pm 5\%$  de Ess y esto provoca que no se estabilice la planta. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 210 a 300 segundos, debido a la disminución de picos PV, por lo que tiene una estabilidad no mayor a  $\pm 4,8\%$  y un  $T_s$  igual a 45,80 s.

**Figura 47**

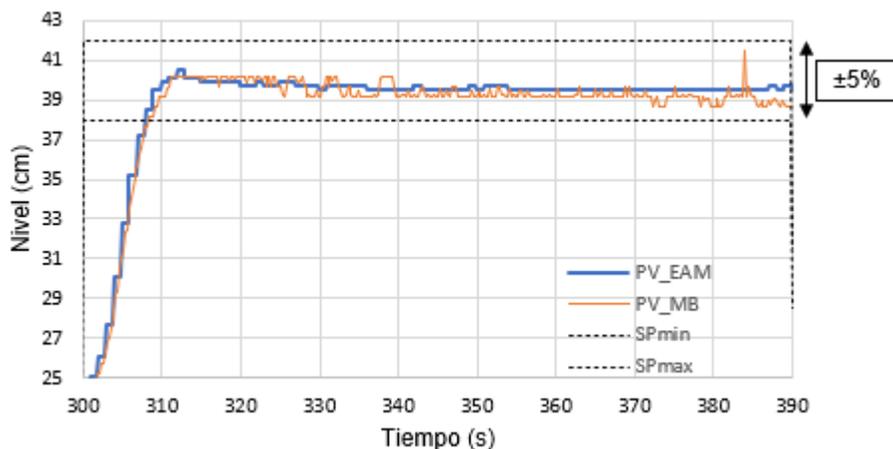
*Respuesta con Fuzzy II de 210 a 300 s*



En la Figura 48 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior señala un transitorio similar al actual de 300 a 308 s. Pasado ese lapso hasta los 390 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta altos picos de magnitud PV, siendo estos ( $Ess = \pm 4,6\%$ ) menores al  $\pm 5\%$ ; luego, la planta de nivel se estabiliza a los 8,36 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 300 a 390 segundos, debido a la disminución de picos PV, por lo que tiene una estabilidad no mayor a  $\pm 3,9\%$  y un  $T_s$  igual a 7,95 s.

### Figura 48

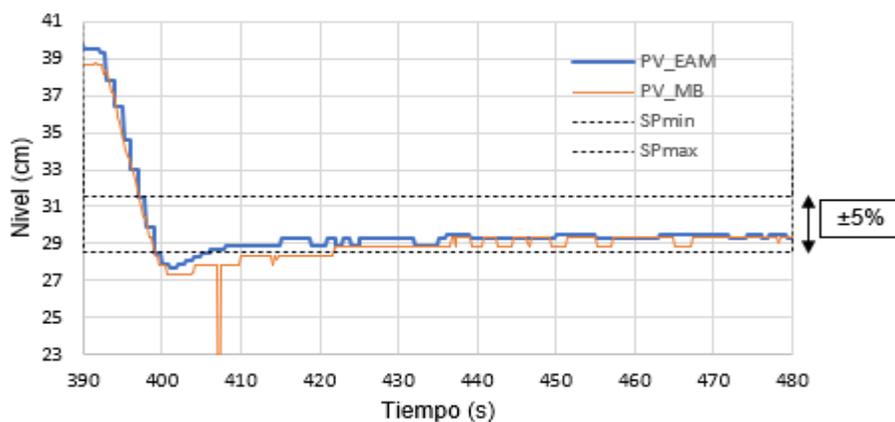
*Respuesta con Fuzzy II de 300 a 390 s*



En la Figura 49 s se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior ofrece un transitorio similar al actual de 390 a 406 s. Luego, decae la señal de respuesta debido a una pérdida de los datos lo que provoca un aumento del tiempo transitorio y genera picos de magnitud PV, por ende, se establece la planta a los 31,80 s con un  $Ess$  igual a  $+4,2\%$ . En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 390 a 480 segundos, debido a la disminución de picos PV, por lo que tiene una estabilidad no mayor a  $+4,4\%$  y un  $T_s$  igual a 16,14 s.

**Figura 49**

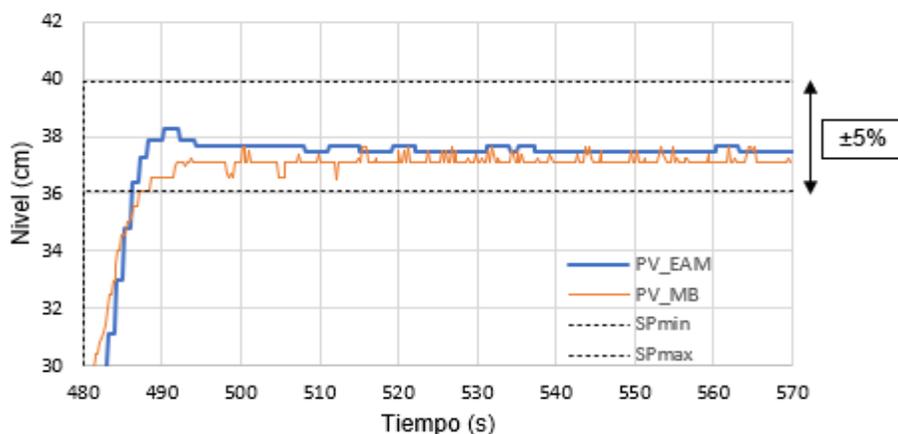
*Respuesta con Fuzzy II de 390 a 480 s*



En la Figura 30 se observa que la respuesta PV del sistema con el sensor anterior exhibe una rapidez menor al actual en el transitorio de 480 a 486 s. Pasado ese lapso hasta los 570 s se pierden algunos datos en la medición de nivel con el sensor anterior por lo que presenta picos de magnitud PV. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor al  $\pm 5\%$ , de tal manera que posee un valor Ess igual a  $\pm 4,0\%$  y se estabiliza a los 8,56 s. En cambio, con el sensor actual se muestra un mejoramiento de la señal de respuesta en el periodo de 480 a 570 s, debido a la disminución de picos PV, por lo que posee una estabilidad no mayor al  $\pm 4,1\%$  y un Ts igual a 6,21 s.

**Figura 50**

*Respuesta con Fuzzy II de 480 a 570 s*



Una vez analizada la respuesta de nivel PV dentro de los rangos antes mencionados, se demuestra que el sensor actual ofrece un mejor rendimiento al anterior ya que realiza mediciones de 0 a 40 cm. Además, presenta una señal de salida más estable.

### **Evaluación de la planta**

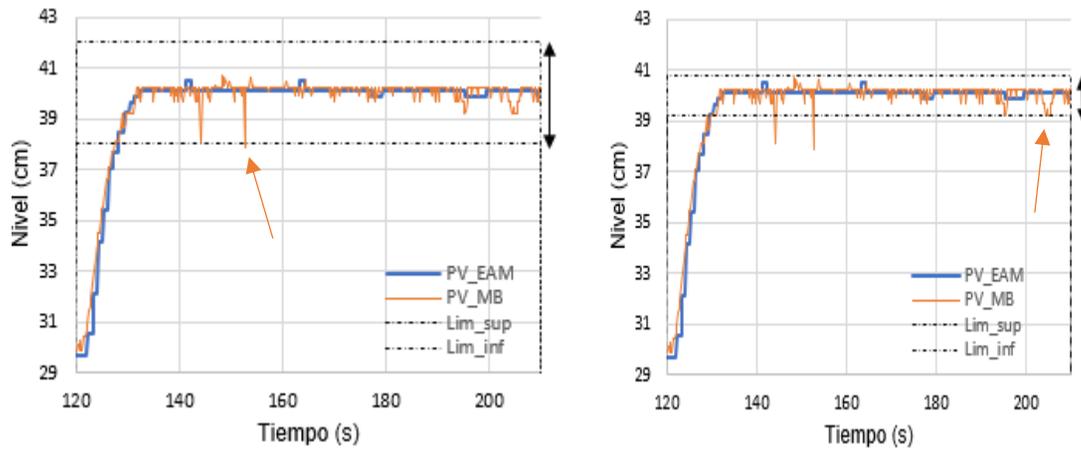
Se realiza un resumen del comportamiento de la planta de nivel en base a las mismas experimentaciones propuestas por los tesisistas Cuadrado Comina y González Bravo donde se considera una validación del sistema en la medición de nivel, de tal modo que estos valores no deben superar el  $\pm 5\%$ . Luego, se propone un segundo criterio del  $\pm 2\%$  para evaluar que sensor presenta mejores prestaciones en el sistema. Además, se considera un tiempo  $T_s$  máximo de 70 segundos para que el sistema tenga la capacidad de operar correctamente.

A continuación, se realizan pruebas de funcionamiento para un SP que pasa de 30 a 40 cm en el intervalo entre 120 a 210 s:

Bajo un control PID se considera que el sistema con el sensor actual opera adecuadamente cuando se trabaja con estabilidades no superiores al  $\pm 5\%$  y  $\pm 2\%$ , vistos en las Figuras 51.a) y b); respectivamente. Mientras que en la Figura 51.a se muestra un nivel estable a los 32,93 s con el sensor anterior, en cambio, no sucede lo mismo cuando se trabaja con el Ess al  $\pm 2\%$ , en este caso, el sistema no opera adecuadamente ya que se establece a los 85,63 s y muestra Ess superiores a  $\pm 2\%$ .

**Figura 51**

Resultados del sistema con PID



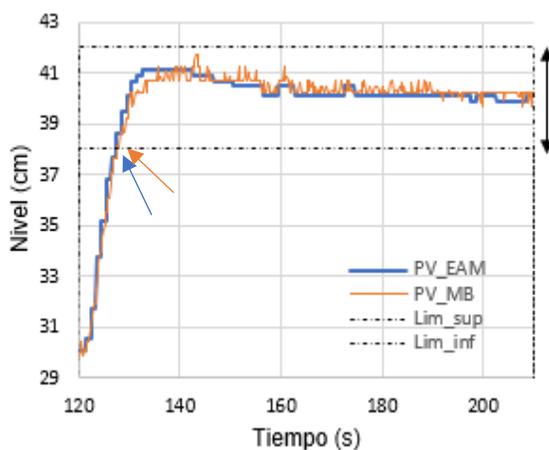
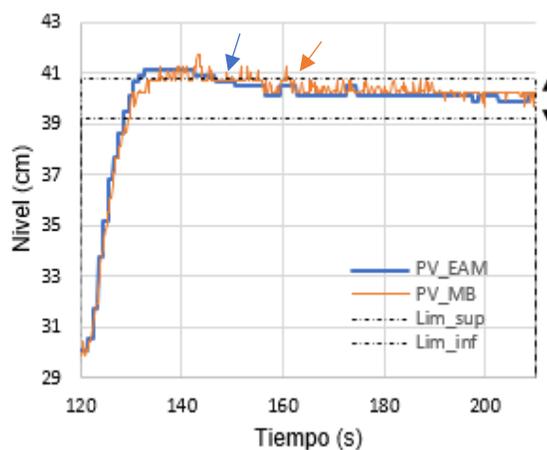
a) Bajo una estabilidad de  $\pm 5\%$

b) Bajo una estabilidad de  $\pm 2\%$

Bajo un control Fuzzy I se considera que el sistema con el sensor actual opera adecuadamente cuando se trabaja con una estabilidad no mayor al  $\pm 5\%$ , visto en las Figuras 52.a) con un  $T_s$  de 8,30 s. Luego, se disminuye el Ess a  $\pm 2\%$  y se observa a través de la Figura 52.b) como se demora unos 18,3 s más que la anterior prueba para establecerse, este igual cumple con el criterio de estabilidad mencionado. Lo mismo ocurre con el sensor anterior, opera dentro de los límites Ess antes mencionados y se establecen a los 7,62 s (Figura 52.a) y 41,31 s (Figura 52.b).

**Figura 52**

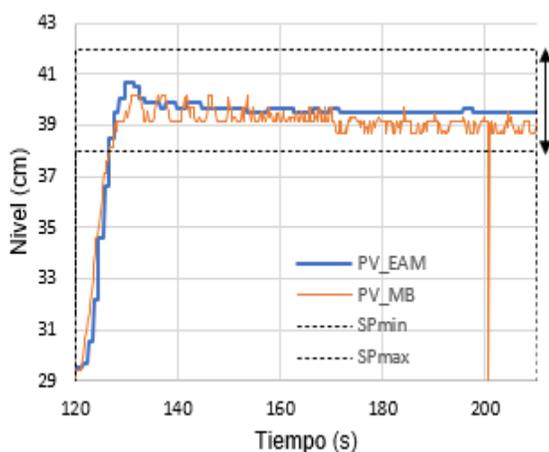
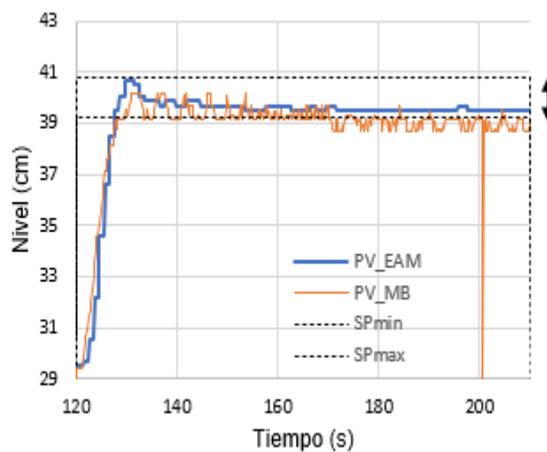
*Resultados del sistema con Fuzzy I*

a) Bajo una estabilidad de  $\pm 5\%$ b) Bajo una estabilidad de  $\pm 2\%$ 

Bajo un control Fuzzy II se considera que el sistema con el sensor actual opera adecuadamente cuando se trabaja con estabilidades no superiores al  $\pm 5\%$  y  $\pm 2\%$ , vistos en las Figuras 53.a) y b); respectivamente. Mientras que con el sensor anterior no opera adecuadamente con cualquiera de los criterios antes mencionados.

**Figura 53**

*Resultados del sistema con Fuzzy II*

a) Bajo una estabilidad de  $\pm 5\%$ b) Bajo una estabilidad de  $\pm 2\%$

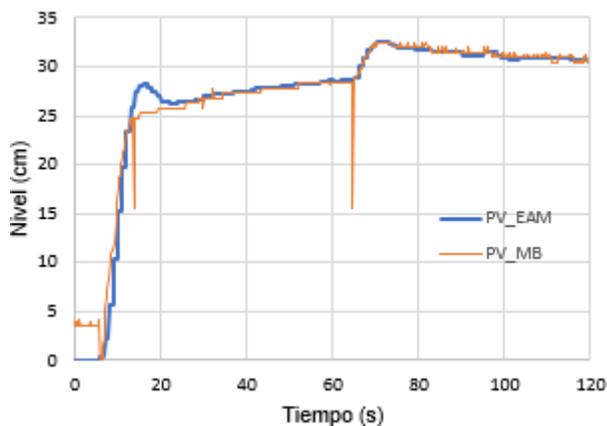
Por lo tanto, se concluye que el sensor actual presenta una señal más estable en comparación al anterior.

Se realizan pruebas de funcionamiento en el intervalo de 0 a 120 s, para observar en que infiere la perturbación externa en el sistema. Esta se realiza con el cierre manual de la válvula de descarga al 50 % (ver Figura 54.d) a los 60 segundos, donde se muestra un cambio en la señal PV ya sea con el uso del sensor actual o el anterior. Tomando como referencia una estabilidad no superior al  $\pm 5$  %, se concluye lo siguiente:

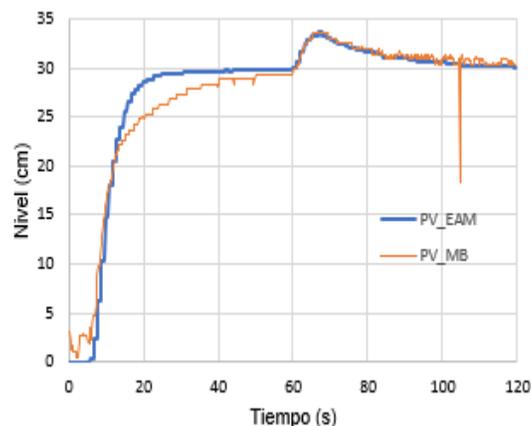
- La prueba con el controlador PID se observa en la Figura 54.a), donde se tiene que el sensor actual presenta un cambio PV a los 60 s y por lo tanto retarda un poco a la señal. Lo mismo ocurre con el sensor anterior, siendo estos  $T_s$  similares a los 98 s aproximadamente. Pese a ello, se obtiene un error  $E_{ss}$  de  $\pm 11,3$  mm ( $\pm 3,8$  %) con el sensor actual, mientras que con el anterior presenta un  $E_{ss}$  igual a  $\pm 14,4$  mm ( $\pm 4,8$  %).
- La prueba con el controlador Fuzzy I se observa en la Figura 54.b), donde se tiene que el sensor actual ( $T_s = 83,92$  s) es más rápido que el anterior ( $T_s = 105$  s) para el tiempo transitorio.
- La prueba con el controlador Fuzzy II se observa en la Figura 54.c), donde se tiene que el sensor actual ( $T_s = 68,4$  s) es más rápido que el anterior ( $T_s = 80,1$  s) para el tiempo transitorio. Gracias a la perturbación externa, el  $T_s$  mejora con respecto a las dos pruebas anteriores.

Figura 54

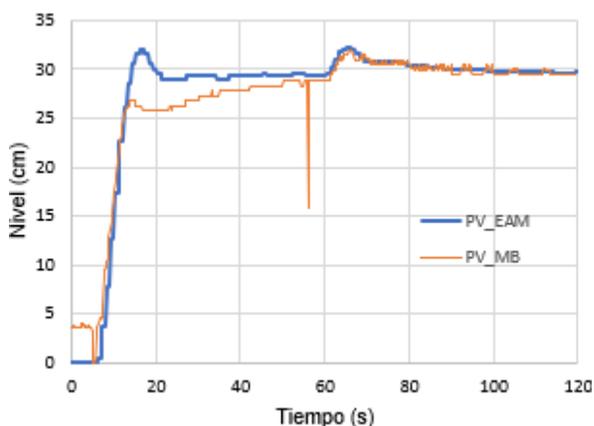
## Pruebas de la planta con perturbaciones



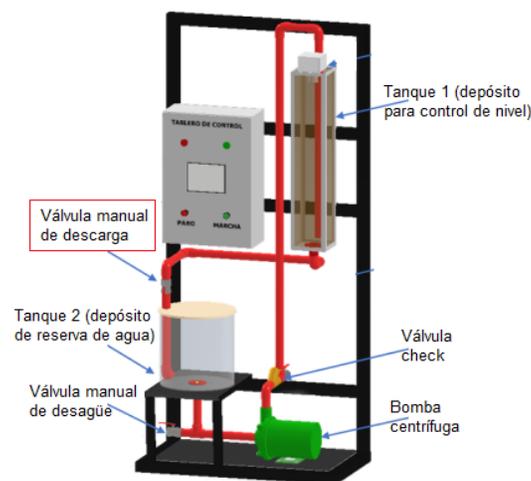
a) Prueba con PID



b) Prueba con Fuzzy I



c) Prueba con Fuzzy II



d) Válvula (perturbación)

Por tanto, cuando el sistema opera a un SP igual a 30 cm con perturbación se observa en las Figuras anteriores que los controladores hacen la función de corregir y obtener un PV deseado cumpliendo el Ess dentro de la tolerancia permitida ( $\pm 5\%$ ). Sin embargo, aumenta el tiempo de establecimiento, superando los 70 segundos; lo cual indica que una perturbación hace más lento al proceso de la planta.

## Conclusiones

- El estudio de los diversos protocolos de comunicación industrial contiene características similares como el hecho de que opera bajo el modo maestro/esclavo con el propósito de enlazar la comunicación entre la Raspberry Pi y el sensor actual. Además, se considera de estándar abierto, ya que admite la configuración por software del protocolo de comunicación. Sin embargo, se escoge en esencia al bus de campo tipo Modbus ya que permite acoplarse de forma directa a la salida del sensor, el cual opera con una señal de 4 a 20 mA.
- Una vez definido el protocolo Modbus, se consideran algunos aspectos previos a la selección como los 12 V de alimentación al dispositivo, la transformación de 4-20 mA al estándar RS485 y que los dispositivos seleccionados sean de bajo costo, como el módulo Taidacent AD multicanal.
- El sensor de presión EAMPPT-136 es un dispositivo de bajo costo y lo hace ideal para realizar mediciones de nivel dentro del tanque entre 0 a 70 cm, el cual cuenta con una protección IP68 por lo que puede ubicarse fácilmente en la parte inferior del tanque. También se considera como un sensor de baja precisión y exactitud cuya señal de salida es de 4 a 20 mA. Este sensor, se conecta de forma directa hacia el Taidacent AD multicanal, el cual es un dispositivo de bajo costo que realiza la conversión al estándar RS485 y más la adición del convertidor Waveshare que enlaza una conexión hacia Raspberry Pi el cual permite realizar la comunicación industrial en la planta.
- El protocolo de comunicación Modbus se configura por software de manera sencilla y eficaz a través de la Raspberry Pi bajo el modo RTU, cuya comunicación se distribuye en bits de inicio, transmisión de datos, paridad, paro y el tiempo de espera; esta trama de comunicación se adapta fácilmente al Modbus para que reciba sin el menor de los problemas la información de la altura del tanque del sensor de nivel.

- El sensor EAMPPT-136 opera de forma correcta ante el cambio brusco o inmediato del nivel en el tanque, el cual presenta errores porcentuales no mayores al 1,8 % con las perturbaciones realizadas. Luego, se conecta a los dispositivos de comunicación y control para obtener mediciones de nivel, siendo este no superior al 1,9 % de error; del cual es un valor bajo pese al ruido que existe en los dispositivos conectados a la planta.
- Para las pruebas de funcionamiento de la tesis anterior, se considera el modo automático bajo el uso de los controles PID, Fuzzy I y II para un SP variable, con el propósito de determinar la respuesta transitoria (tiempo de establecimiento) y el error en estado estable cuya medida SP no sea superior al  $\pm 5\%$ . Aplicando el sensor actual se demuestra que presenta mejores beneficios al anterior ya que muestra medidas reales entre 0 a 40 cm de altura y obteniendo una señal de salida más estable donde no se observa pérdida en los datos de nivel e inclusive trabaja bien con perturbaciones externas e internas. Además, si se considera un control más robusto, se demuestra que, con el sensor actual la planta opera adecuadamente ante una estabilidad de  $\pm 2\%$ .

## Recomendaciones

- Previo a la selección del protocolo de comunicación se debe tener en cuenta la disponibilidad de los dispositivos en el mercado y tiempos de exportación para evitar problemas durante la implementación. Además, se recomienda que durante el diseño se prevea siempre las conexiones de entrada y salida del Modbus, los cuales son conectados al sensor y controlador; respectivamente.
- Si se utiliza otro sensor el cual se instale dentro del tanque y sumergido a tiempo completo en el líquido se recomienda que la protección integral mínima sea IP58.
- Debido a que existe insuficiente información sobre la trama de comunicación del dispositivo Taidacent AD multicanal, se recomienda utilizar los parámetros indicados en el catálogo propuesto en el Anexo 1. Y con ello, llevar una adecuada comunicación entre el sensor y el controlador.
- Cuando se realizan pruebas de funcionamiento del sensor de nivel, se recomienda generar medidas con cambios rápidos para conocer la fiabilidad y exactitud, a la vez que opere dentro de un rango tolerable.
- Se recomienda utilizar el sensor EAMPPT-136 ya que permite medir la altura del tanque desde 0 cm hasta su valor máximo, ofreciendo así, un rango adecuado de la lectura de datos en la planta de nivel.

### **Trabajos Futuros**

- Si se consideran otros medios de comunicación ya sea a bajo o alto costo, se recomienda a trabajo futuro la implementación del bus de tipo Fieldbus y/o Profibus que son de estándar abierto y altamente aplicados en la industria.
- Si la planta de nivel se expande con varios sensores y actuadores, se recomienda a trabajo futuro que se implemente un servidor IP para gestionar la conexión entre los dispositivos y el sitio de destino.

## Bibliografía

- Andrade, R., & Macas, W. (2010). Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel. (*Título de Grado*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Arias, M. (2013). Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico en Automatización Industrial para la Empresa Ecuainsetec. (*Tesis de Grado*). Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Autycom. (26 de Marzo de 2022). *Pirámide de automatización: 5 niveles tecnológicos en el entorno industrial*. Obtenido de Automatización y control de procesos: <https://www.autycom.com/piramide-de-automatizacion-5-niveles-tecnologicos/>
- Berge, J. (2002). *Fieldbuses for Process Control: Engineering, Operation, and Maintenance*. Durham, NC: International Society of Automation.
- Chavez, N. (2015). Planta de control de Nivel. (*Paper*). Universidad Nacional del Callao, Callao.
- Cuadrado Comina, J., & Gonzalez Bravo, D. (2022). *Estudio comparativo entre controladores: PID e inteligentes (Lógica Difusa Tipo II) utilizando una planta*. Latacunga: Universidad de Las Fuerzas Armadas.
- Doria, S. (21 de Agosto de 2020). *¿Qué es y cómo funciona un interruptor de flotador?* Obtenido de WIKA: <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/caudal/qu-cmo-funciona-interruptor-flotador/>
- Eicos. (2022). *Sensores de Nivel Eicos para líquidos*. Obtenido de Sensores de Nivel: <https://www.eicos.com/sensor-de-nivel/>
- Garcés Pico, J. C., & León Calderón, J. P. (2015). *Diseño e Implementación de una Planta de nivel, controlada mediante redes neuronales y lógica difusa, destinada al laboratorio de control industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.

- Guimeráns, P. (5 de Mayo de 2018). *¿Qué es un sensor? Tipos y diferencias* . Obtenido de PrototipadoLAB: <https://prototipadolab.com/2018/05/05/que-son-los-sensores/#:~:text=Un%20sensor%20%E2%80%93%20que%20tambi%C3%A9n%20se,medio%20f%C3%ADsico%20que%20nos%20rodea.>
- Hauser, E. (2022). *Medición de nivel*. Recuperado el 20 de octubre de 2022, de <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel>
- HBM. (2022). *Definición de un sensor de presión*. Recuperado el 13 de diciembre de 2022, de <https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/>
- Hurtado Torres, J. (30 de Marzo de 2020). *Electricidad Electrónica I.E.S. Himilce - Linares*. Obtenido de Introducción a las redes de comunicación industrial: [http://www.infopl.net/files/documentacion/comunicaciones/infoPLC\\_net\\_introduccion-a-las-redes-de-comunicacion-industrial.pdf](http://www.infopl.net/files/documentacion/comunicaciones/infoPLC_net_introduccion-a-las-redes-de-comunicacion-industrial.pdf)
- Inc., M. O. (2002). *Modbus FAQ: About the Protocol*. Obtenido de Modbus: <https://modbus.org/>
- Intel, C. (1988). *The BITBUS™ interconnect serial control bus specification*. Obtenido de Intel: <http://www.bitbus.org/dnl/BITBUS%20Interconnect%20Specification.PDF>
- Marín, J. (2001). Estudio para rehabilitar el Sistema de Medición y Control de Tanques de almacenamiento de la Refinería Esmeraldas. (*Tesis de Grado*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Mariño, M. (2012). Sistema de contabilidad de costos y el nivel económico de la planta de balanceados del Gobierno Municipal de Mocha. (*Tesis*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Matos, H. (2011). Supervisión y Control de las Instalaciones Eléctricas de Distribución mediante Bus de Campo. (*Tesis de Grado*). Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo.
- Mazzone, V. (2002). *Automatización y Control Industrial*. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Prentice Hall.

- Palma Castro, C., & Rodríguez Osorio, S. (2011). *Development boards: Tools for design*. Bogotá: Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central.
- Patache Allauca, G. (2013). Diseño, dimensionamiento y selección de un sistema AS-Interface para el proceso de llenado de líquidos. (*Tesis de Grado*). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba.
- Profibus. (2022). *PROFIBUS*. Obtenido de Profibus - Profinet: <https://www.profibus.com/>
- Raspberry, P. (2022). *Computing for everybody*. Obtenido de Raspberry Pi: <https://www.raspberrypi.com/>
- Sanchez, C. (2021). Diseño de un sistema de llenado automático para fluidos líquidos y viscosos. (*Tesis*). Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Torres, J., & Chanoluisa, S. (2015). Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el Laboratorio de Automatización Industrial. (*Tesis de Grado*). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Guayaquil.
- Türkiye, S. (2022). *AS-Interface - Akilli saha veri yolu standardi*. Obtenido de New Siemens: <https://new.siemens.com/tr/tr/urunler/automation/industrial-communication/as-interface.html>
- Williams, R. (1992). *Del lenguaje a la escritura*. España: Editorial Bosh, S.A.
- Zambrano, R., & Caballero, C. (2018). Diseño e Implementación de una red Modbus/rtu entre dos autómatas programables S7-1200 basados en el estándar RS485. (*Tesis*). Universidad Politecnica Salesiana, Guayaquil.

## Anexos