

Diseño e implementación de un módulo de expansión de entradas digitales/analógicas para

Controlador Lógico Programable con comunicación Modbus

Samir Andrés Velasco Niño

Andrés Camilo Fuquen Gil

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Maestría en Potencia Eléctrica

Codirector

Alfredo Rafael Acevedo Picón

Maestría en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Primeramente, dedico este logro a Dios, por brindarme la fortaleza necesaria y guiar mis pasos en todo el camino, por permitirme crecer en su fe, ahora como un profesional a su servicio, con valores y aptitudes.

A mi madre, quien siempre me ha acompañado, y que, con la fuerza de su amor incondicional, cada día es para mí ejemplo de lucha, resiliencia y perseverancia; este logro es tuyo, Gloria.

A mi padre, quien me enseñó que todo es posible con esfuerzo y dedicación, que no hay excusas para lograr lo que te propones; este logro es tuyo, Waldo.

A mis hermanos, por sus consejos, palabras de aliento y alegrías compartidas, este logro también es de ustedes, Julio y Sergio.

**SAMIR VELASCO**

Desde mi corazón, dedico este logro a mis padres que me enseñaron a vencer los obstáculos con la fe puesta en Dios, entregándome así la llave del triunfo.

A mis abuelos, quienes con su gran experiencia de los años vividos me brindaron seguridad con sus consejos.

A mis tíos, quienes han forjado en mí el vigor para luchar y la satisfacción por el deber cumplido.

A toda mi familia y a las demás personas que con hilos de comprensión tejieron para mí el traje de fortaleza que me llevó al peldaño que hoy estoy pisando.

**ANDRÉS FUQUEN**

### **Agradecimientos**

En primer lugar, como autores de este proyecto deseamos expresar nuestro mayor agradecimiento a Dios, por brindarnos la fortaleza necesaria para perseverar durante el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado, siendo guía en cada uno de nuestros caminos.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, con quiénes compartimos conocimientos, alegrías y frustraciones.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a los destacados docentes de la Universidad Industrial de Santander, en especial, a los de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Sus valiosas enseñanzas han contribuido de manera significativa a la formación de los conocimientos necesarios en el desarrollo de esta tesis.

Especial agradecimiento a nuestro director, Magíster Jaime Guillermo Barrero Pérez, y codirector, Magíster Alfredo Rafael Acevedo Picón. Su vasta experiencia y conocimientos han guiado de manera acertada todo el proceso. Su constante acompañamiento en cada etapa de la investigación ha sido fundamental para el éxito de este proyecto. Adicionalmente, agradecemos al docente Mag. Jair Elías Araujo Vargas por apoyarnos y respaldar el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, gran referente nacional de educación superior en Colombia, por brindarnos la oportunidad de formarnos en su campus, gracias a su infraestructura y comunidad educativa, que han sembrado la semilla de los futuros profesionales del país durante 76 años.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2. Marco referencial .....	15
2.1 Controlador Lógico Programable (PLC) .....	15
2.2 Protocolo de Comunicación Modbus.....	19
2.3 Expansión de entradas y salidas en PLC.....	25
2.4 Amplificador operacional (OpAmp).....	27
2.5 Regulador de voltaje .....	29
2.6 Sensores de 4 – 20 mA.....	30
2.7 Optoacoplador.....	31
2.8 Módulo ESP-32.....	32
3. Metodología .....	34
3.1 Diseño conceptual.....	35
3.2 Fases de la investigación.....	36
4. Ejecución y resultados del proyecto .....	37
4.1 Fase 1: Diseño de la tarjeta electrónica.....	37
4.1.1 Circuito de entrada digital.....	39
4.1.2 Circuito de entrada analógica.....	40
4.1.3 Circuito de salida digital .....	41

4.1.4 Circuito de salida analógica .....	42
4.1.5 Circuito de alimentación .....	44
4.2 Fase 2. Selección de componentes .....	45
4.3 Fase 3: Implementación y validación .....	47
4.3.1 Enrutamiento de PCB y visualización digital .....	47
4.3.2 Fabricación y soldadura de componentes .....	52
4.3.3 Conexión en red local TCP/IP .....	54
4.3.4 Desarrollo de códigos .....	58
4.3.5 Validación de funcionamiento .....	67
4.4 Características del componente.....	73
4.5 Presupuestos.....	74
5. Conclusiones .....	77
6. Recomendaciones .....	78
Referencias bibliográficas.....	79

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Funciones de Modbus</i> .....	24
Tabla 2 <i>Componentes seleccionados</i> .....	45
Tabla 3 <i>Tabla de instrucciones Modbus en TIA Portal</i> .....	60
Tabla 4 <i>Características eléctricas</i> .....	73
Tabla 5 <i>Costo total de la tarjeta electrónica</i> .....	74

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Sistema PLC</i> .....	16
Figura 2 <i>Algunos comercializadores de PLC</i> .....	19
Figura 3 <i>Esquema Cliente/Servidor en Modbus</i> .....	23
Figura 4 <i>Amplificador operacional</i> .....	28
Figura 5 <i>Esquema de un optoacoplador</i> .....	32
Figura 6 <i>Pinout ESP32 DevKIT V1</i> .....	33
Figura 7 <i>Circuito esquemático general</i> .....	38
Figura 8 <i>Circuito de entrada digital</i> .....	39
Figura 9 <i>Circuito de entrada analógica</i> .....	40
Figura 10 <i>Circuito digital de salida</i> .....	42
Figura 11 <i>Circuito analógico de salida</i> .....	43
Figura 12 <i>Circuito de alimentación</i> .....	44
Figura 13 <i>Cálculo de ancho de trazas para PCB</i> .....	48
Figura 14 <i>Regla de diseño utilizada</i> .....	49
Figura 15 <i>Vista de capa superior</i> .....	49
Figura 16 <i>Vista de capa inferior</i> .....	50
Figura 17 <i>Simulación 3D capa superior</i> .....	51
Figura 18 <i>Simulación 3D capa inferior</i> .....	51
Figura 19 <i>Esquema final de la tarjeta</i> .....	52
Figura 20 <i>Fabricación de la tarjeta electrónica</i> .....	53
Figura 21 <i>Resultado final tarjeta electrónica</i> .....	54

Figura 22 <i>Conexión en red local</i> .....	55
Figura 23 <i>Ajuste de dirección IP del PLC en TIA Portal</i> .....	56
Figura 24 <i>Configuración IP de ESP32 en IDE Arduino</i> .....	57
Figura 25 <i>Visualización de red local</i> .....	58
Figura 26 <i>Código ESP32 como Cliente</i> .....	62
Figura 27 <i>Bloque de Sistema MB_SERVER</i> .....	63
Figura 28 <i>Bloque de Datos DATA_MB</i> .....	64
Figura 29 <i>Código ESP32 como Servidor</i> .....	65
Figura 30 <i>Bloque MB_Client TIA Portal</i> .....	66
Figura 31 <i>Bloque de datos DATA_MB</i> .....	67
Figura 32 <i>Validación circuito de alimentación</i> .....	68
Figura 33 <i>Validación salidas digitales</i> .....	69
Figura 34 <i>Validación salidas analógicas</i> .....	70
Figura 35 <i>Validación entradas analógicas</i> .....	71
Figura 36 <i>Validación entradas digitales</i> .....	72
Figura 37 <i>Módulo de salidas digitales</i> .....	75
Figura 38 <i>Módulo entradas digitales</i> .....	75
Figura 39 <i>Módulo salidas analógicas</i> .....	76
Figura 40 <i>Módulo entradas analógicas</i> .....	76

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de un módulo de expansión de entradas digitales/analógicas para Controlador Lógico Programable con comunicación Modbus\*

**Autores:** Samir Andrés Velasco Niño y Andrés Camilo Fuquen Gil\*\*

**Palabras clave:** PLC, automatización, redes de comunicación, electrónica industrial, Modbus, módulo expansor, TCP/IP, ESP32.

El aumento de precios en tecnología, incluyendo los PLC, debido a factores como la escasez de semiconductores y la fluctuación de la moneda, presenta desafíos para la competitividad de las empresas colombianas. Con procesos de industrialización crecientes, es necesario monitorear y controlar un mayor número de variables físicas en los procesos industriales, lo cual implica un mayor número de conexiones con sensores, actuadores y dispositivos periféricos. Se hace entonces necesario ampliar la capacidad operativa de los PLC, con el fin de mantener la competitividad y mejorar la productividad de los procesos industriales. Es imperativo que Colombia fomente la innovación tecnológica y la industrialización nacional para reducir su dependencia de tecnologías importadas y fortalecer su autonomía tecnológica a largo plazo.

Esta investigación busca evaluar la validez del diseño de una tarjeta electrónica que integra un PLC S7 1500 y un módulo con microcontrolador ESP32 de manera inalámbrica para ampliar las capacidades de entrada y salida de señales analógicas y digitales del PLC. Se evidencia en la investigación que este microcontrolador puede ser configurado en diferentes roles mediante el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP, ya sea como cliente o servidor, de acuerdo con los requisitos y objetivos del usuario.

Este hallazgo sugiere que la implementación de esta tarjeta electrónica proporciona flexibilidad y versatilidad en diversos contextos industriales, contribuyendo así a mejorar la eficiencia y la adaptabilidad de los sistemas de control.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Magister en Potencia Eléctrica. Codirector: Alfredo Rafael Acevedo Picón. Magister en Ingeniería Electrónica.

### Abstract

**Title:** Design and Implementation of a Digital/Analog Input Expansion Module for Programmable Logic Controller with Modbus Communication\*

**Author(s):** Samir Andrés Velasco Niño y Andrés Camilo Fuquen Gil\*\*

**Keywords:** PLC, Automation, Communication Networks, Industrial Electronics, Modbus, Expansion Module, TCP/IP, ESP32.

Rising prices in technology, including PLCs, due to factors such as semiconductor shortages and currency fluctuation, present challenges for the competitiveness of Colombian companies. With increasing industrialization processes, it is necessary to monitor and control a greater number of physical variables in industrial processes, which implies a greater number of connections with sensors, actuators, and peripheral devices. It is then necessary to expand the operational capacity of PLCs, to maintain competitiveness and improve the productivity of industrial processes. It is imperative that Colombia promotes technological innovation and national industrialization to reduce its dependence on imported technologies and strengthen its technological autonomy in the long term.

This research seeks to evaluate the validity of the design of an electronic card that integrates an S7 1500 PLC and an ESP32 microcontroller module wirelessly to expand the input and output capabilities of analog and digital signals of the PLC. It is evidenced in the research that this microcontroller can be configured in distinct roles through the Modbus TCP/IP communication protocol, either as a client or server, according to the user's requirements and objectives.

This finding suggests that the implementation of this electronic card provides flexibility and versatility in various industrial contexts, thus contributing to improve the efficiency and adaptability of control systems.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Master's in Electric Power. Co-director: Alfredo Rafael Acevedo Picón. Master's in Electronic Engineering.

## **Introducción**

Los Controladores Lógicos Programables (PLC), considerados el cerebro de la industria moderna, han propiciado avances significativos en la automatización industrial. Estos dispositivos compactos están transformando la operatividad de máquinas y procesos industriales.

Los PLC resultan vitales para el correcto funcionamiento de una amplia gama de procesos industriales y de fabricación, facilitando una automatización, eficiencia y flexibilidad superiores. Desde fábricas automatizadas hasta plantas de energía, los PLC se emplean en diversos campos donde la operación continua es esencial y prioritaria; es decir, se utilizan en aplicaciones críticas para garantizar una operación segura y confiable. Estos sistemas programables constituyen una parte fundamental de la tecnología que sustenta nuestra economía actual. Sin su presencia, muchos procesos serían ineficientes, inseguros y costosos.

Además de su importancia, los PLC son flexibles y escalables, adaptándose a diversas aplicaciones y cambios en el proceso de producción. Permiten la comunicación con otros sistemas y dispositivos, como robots, pantallas y sensores, favoreciendo una mayor automatización y una toma de decisiones más efectiva.

En Colombia, se ha evidenciado un decaimiento en los procesos industriales, pero la demanda de productos cada vez crece, es necesario incrementar la producción de productos, bienes y servicios para satisfacer los requerimientos de la sociedad colombiana. Estos procesos productivos implican el monitoreo y control de diversas variables y magnitudes físicas, para las cuales se requieren actuadores que excedan la capacidad humana, ya sea por nuestra reacción limitada o nuestras capacidades físicas. Por lo tanto, se hace uso de máquinas autómatas, como los PLC. Es cada vez más imperativo supervisar y controlar un mayor número de variables físicas, lo que conlleva el uso de más módulos periféricos como sensores digitales o analógicos. Los PLC se

ven restringidos por su capacidad de entrada de información, lo que dificulta cumplir a cabalidad con los procesos para los que se requieren.

Los precios de los productos tecnológicos han experimentado fluctuaciones debido a diversos factores. La pasada pandemia ha generado un alza en los precios, y esta tendencia se ha mantenido debido a la crisis de contenedores a nivel global, especialmente en China, uno de los principales proveedores internacionales de tecnología (Lesmes, 2022). Además, la escasez de semiconductores como materia prima, causada por la alta demanda en la producción de microprocesadores, también ha contribuido a la subida de precios (Cajamarca, 2021).

La fluctuación e inestabilidad de la moneda, influenciadas por factores geopolíticos, y la escasez de semiconductores, atribuida a la alta demanda provocada por la pandemia, generan varios impactos negativos en el sector tecnológico de Colombia. Esto resulta en que los componentes y equipos tecnológicos importados, esenciales para el desarrollo de proyectos industriales, se vuelvan más costosos, aumentando así la inversión requerida por las empresas que buscan implementar estas tecnologías en sus procesos productivos.

El alza en el costo de estas tecnologías tendría un impacto negativo en la competitividad de las pequeñas y medianas empresas colombianas (pymes) en comparación con otras empresas en el mercado. Dificultaría a las pymes competir con empresas multinacionales en términos de eficiencia, costos y calidad. En el caso de que las empresas ya cuenten con PLC y tecnologías relacionadas como parte de su infraestructura industrial, un aumento en los precios significaría destinar más recursos para el mantenimiento y reparación de estos sistemas. Esto, a su vez, incrementaría los costos operativos y reduciría los márgenes de utilidad. Además, podría desincentivar a las empresas locales a invertir en automatización, ya que podría resultar menos

rentable o incluso no rentable en comparación con otras opciones de inversión, lo que implicaría el retraso o incluso la detención de la implementación de proyectos de automatización.

En el contexto actual, es evidente la necesidad de que Colombia no dependa exclusivamente de tecnologías importadas, sino que fomente la innovación tecnológica y la industrialización nacional, pues podría afirmarse que Colombia está atascada en la dependencia (Acosta, 2023). Esta dependencia tecnológica puede representar un obstáculo para el desarrollo económico y la competitividad del país a largo plazo. Por ello, es fundamental impulsar políticas y estrategias que promuevan la investigación, el desarrollo y la adopción de tecnologías nacionales, así como la formación de profesionales altamente capacitados en el ámbito de la tecnología y la ingeniería. De esta manera, Colombia podrá fortalecer su autonomía tecnológica, reducir su vulnerabilidad a las fluctuaciones del mercado internacional y contribuir al crecimiento sostenible y equitativo de su economía.

Por lo tanto, es crucial explorar soluciones que posibiliten la expansión de la capacidad operativa de la tecnología PLC. La implementación de un dispositivo que permita ampliar las entradas y salidas de los autómatas programables sería esencial, pues, de esta manera, se facilitaría la lectura y escritura de información de un mayor número de equipos electrónicos. Entendiendo que los PLC son componentes fundamentales en la automatización de los procesos industriales, y desempeñan un papel significativo en la mejora de la competitividad y eficiencia de las empresas.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Diseñar e Implementar un prototipo para la expansión de entradas digitales y analógicas para un Controlador Lógico Programable (PLC) con comunicación Modbus.

### **1.2 Objetivos específicos**

Diseñar un circuito electrónico basado en microcontrolador que permita manejar entradas y salidas analógicas y digitales.

Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para la implementación de la tarjeta electrónica, basado en criterios económicos, de disponibilidad y compatibilidad.

Implementar, mediante MODBUS, la comunicación entre una tarjeta electrónica y un Controlador Lógico Programable (PLC) mediante el uso del software TIA Portal.

Validar la lectura digital/analógica con el Controlador Lógico Programable (PLC) del módulo expensor mediante comunicación Modbus.

## **2. Marco referencial**

Este capítulo establece los referentes teóricos que enmarcan la base investigativa, centrándose en el uso del protocolo de comunicación Modbus como eje para ampliar la capacidad de entradas y salidas de las señales análogas y digitales de la tecnología PLC en la automatización de procesos.

### **2.1 Controlador Lógico Programable (PLC)**

La revolución industrial ha sido un testamento del constante desarrollo de la industria y el comercio a lo largo de los años, destacando la relevancia central de la mano de obra en la ejecución de procesos industriales a gran escala. A medida que el tiempo avanzaba, surgió la imperante necesidad de automatizar estos procesos para lograr mayores eficiencias, conduciendo a una capacitación continua de la fuerza laboral. Este adiestramiento se diseñó para equipar a los trabajadores con las habilidades necesarias para abordar cualquier contratiempo que pudiera surgir durante las operaciones.

La introducción de la automatización industrial, no obstante, trajo consigo la gestión de un creciente número de variables físicas que requieren control y supervisión. Estas tareas exceden la capacidad directa del ser humano, ya que carece de la destreza y la velocidad de respuesta necesarias para manejar eficientemente los estímulos recibidos por sus sentidos (Mandado et al., 2009).

En consecuencia, la automatización surge como la solución óptima. Un sistema automatizado tiene la capacidad de reaccionar de manera automática ante alteraciones en el funcionamiento de un proceso o máquina, sin requerir intervención humana (Sanchis et al., 2010).

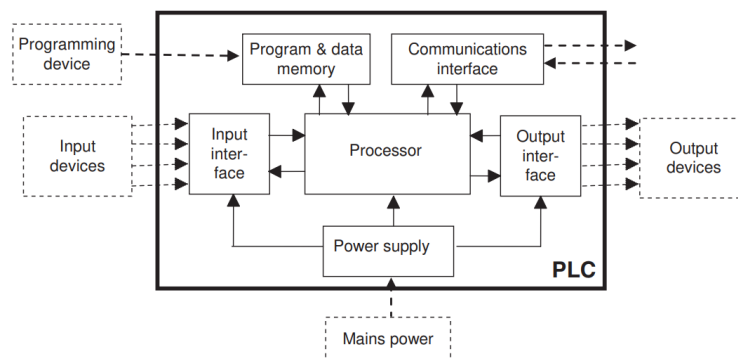
En estos casos, la automatización ejecuta acciones de control diseñadas específicamente para cumplir con la función previamente establecida.

Como resultado, surge el Controlador Lógico Programable (PLC), un dispositivo electrónico digital que mediante una memoria programable almacena instrucciones y realiza diversas funciones en entornos industriales y de automatización (Bolton, 2015). Tales como la ejecución de operaciones lógicas basadas en las instrucciones de programación.; la gestión de secuencias para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro en máquinas y procesos; así como la temporización y el conteo de eventos específicos. Estas funciones son esenciales para procesos que requieren sincronización y medición del tiempo.

Un PLC está físicamente constituido por la unidad de procesamiento, unidad de fuente de alimentación, memorias, interfaz de entrada/salida, interfaz de comunicaciones y dispositivo de programación. El propósito principal del PLC es el control de máquinas y procesos, y se encuentra diseñado específicamente para facilitar su programación.

## Figura 1

### Sistema PLC



*Nota.* Esquema de un sistema PLC. Tomado de Bolton (2015).

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques de un sistema PLC. En este diagrama, las señales de entrada se encuentran representadas como “Input interface” y las de salida como “Output interface”. Los canales de entrada/salida desempeñan funciones de aislamiento y acondicionamiento de señales, programadas de manera que se puedan ejecutar acciones a través de dispositivos externos. Estas salidas son monitorizadas para garantizar que cumplan con la función para la cual se diseñaron.

El PLC tiene la capacidad de transferir, recibir y transmitir datos en redes de comunicación, conectándose con otros dispositivos remotos. Este aspecto resalta la versatilidad del PLC como un elemento central en sistemas automatizados que requieren interconexión y coordinación efectiva. Los PLC pueden comunicarse, por ejemplo, con otros PLC, con sensores, actuadores y sistemas de control superiores. Esto permite la interconexión y el intercambio de datos en una red industrial. Asimismo, un PLC pueden conectarse y controlar una variedad de dispositivos externos, como motores, relés, válvulas, sensores y pantallas. Además, realizan la lectura y control tanto señales digitales como analógicas, pueden recolectar datos en tiempo real sobre el estado del sistema, identificar posibles fallos y proporcionar información valiosa para el mantenimiento predictivo. Esto permite la automatización de procesos industriales complejos permitiendo ser programados y reprogramados ofreciendo una adaptabilidad rápida a cambios en los procesos o requisitos de producción.

La automatización de procesos posibilita la ejecución automática de tareas y operaciones industriales, disminuyendo así la necesidad de intervención manual en dichos procesos. Esto no solo aumenta la eficiencia, sino que también minimiza errores humanos y mejora la consistencia en la ejecución de operaciones.

La importancia de los PLC en los procesos industriales radica en su capacidad de mejorar la eficiencia operativa, la flexibilidad de la producción y de proporcionar un control preciso, haciendo más confiables los procesos industriales. Su capacidad para adaptarse a las demandas cambiantes del entorno industrial contribuye significativamente al éxito y la competitividad de las operaciones manufactureras, donde se incluye:

La programabilidad del PLC brinda flexibilidad y adaptabilidad a los cambios en los procesos de producción. Pueden reprogramarse fácilmente para ajustarse a nuevas especificaciones o para optimizar la eficiencia en función de posibles nuevos requerimientos de la producción. Además, pueden reaccionar rápidamente a cambios en las condiciones del proceso. Su capacidad para procesar información en tiempo real y ejecutar instrucciones de manera instantánea mejora la respuesta a eventos imprevistos o cambios en las variables de producción.

La capacidad de los PLC para realizar cambios rápidos en la lógica de control contribuye a minimizar los tiempos de inactividad. Esto es esencial para optimizar la eficiencia operativa y garantizar una producción continua adicional que permite optimizar el consumo de energía al controlar los dispositivos conectados según las necesidades reales. Esto contribuye a la sostenibilidad y ahorro de costos en el entorno industrial.

Finalmente, los PLC juegan un papel crucial en la implementación de medidas de seguridad industrial. Pueden programarse para detener automáticamente operaciones peligrosas o activar protocolos de seguridad en caso de condiciones anormales.

Entre los proveedores más destacados de PLC se encuentran Siemens AG, conocida por su amplia gama de productos y soluciones de automatización industrial. Rockwell Automation, bajo su marca Allen-Bradley, es otro proveedor líder en el mercado, ofreciendo PLC de alta calidad y confiabilidad. Schneider Electric es reconocido por sus soluciones innovadoras y su enfoque en la

eficiencia energética, mientras que Mitsubishi Electric Corporation destaca por sus PLC robustos y de alto rendimiento. Otros proveedores importantes incluyen Honeywell International Inc; Omron Corporation; ABB Group; Emerson Electric Co; Yokogawa Electric Corporation y General Electric Company (GE), cada uno con sus propias fortalezas y enfoques en el desarrollo de tecnología de automatización industrial. Estos proveedores ofrecen una amplia variedad de PLC que se adaptan a los requerimientos específicos de diferentes industrias y aplicaciones, brindando a los ingenieros y profesionales de automatización las herramientas necesarias para diseñar y optimizar sistemas de control complejos.

## Figura 2

*Algunos comercializadores de PLC*



*Nota.* Tomado de Mordor Intelligence (2024).

## 2.2 Protocolo de Comunicación Modbus

La comunicación en la automatización industrial es un aspecto fundamental para el intercambio de datos entre dispositivos y sistemas dentro de un entorno de producción. La evolución de los protocolos de comunicación ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo y la mejora continua de la automatización industrial.

La comunicación facilita la integración fluida de diversos dispositivos, como sensores, actuadores, controladores y otros componentes. Esto permite la creación de sistemas completos y coherentes haciendo efectiva una comunicación precisa para sincronizar acciones y asegurar que las operaciones se realicen en el orden correcto y en el momento adecuado. Es por esto, que la comunicación facilita la transmisión rápida y precisa de datos, lo que es esencial para optimizar los procesos y tomar decisiones en tiempo real.

Los protocolos de comunicación modernos suelen incluir capacidades de diagnóstico que simplifican la identificación y resolución de problemas, ya que en tiempo real proporciona información actualizada para respaldar la toma de decisiones informada. Esto es esencial para mantener la eficacia y la calidad en la producción.

Entre los protocolos de comunicación que más utilizan en este ámbito destaca el protocolo Modbus, el cual ha sido ampliamente adoptado debido a su simplicidad y eficiencia, suele ser implementado mayormente en sistemas de automatización industrial. El protocolo Modbus, desarrollado en la década de 1970 por Modicon (actualmente Schneider Electric) se ha convertido en uno de los principales estándares de comunicación implementados en el sector de la industria gracias a su simplicidad y versatilidad. Existen variantes del protocolo Modbus, pero las más conocidas son Modbus RTU (Remote Terminal Unit) y Modbus TCP/IP.

De acuerdo con Ruiz Olaya et al., (2024) Modbus/TCP es un estándar de comunicación que ha sido desarrollado específicamente para facilitar la interacción entre diversos dispositivos industriales, como los Controladores Lógicos Programables (PLCs), computadoras, controladores de motores y otros dispositivos de entrada/salida, a través de una red de área local.

El protocolo Modbus es un sistema de comunicación que utiliza una estructura Cliente-Servidor, donde el Cliente inicia las solicitudes y los servidores responden. Se utiliza en sistemas

de automatización industrial, donde el cliente suele ser una interfaz hombre-máquina (HMI, por sus siglas en inglés) o un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés), y los esclavos son sensores, algunos microcontroladores o Controladores Lógicos Programables (PLC).

Las transacciones en redes Modbus TCP/IP implican consultas del cliente a los servidores, donde el cliente inicia una transacción solicitando datos o acciones específicas. Los servidores responden proporcionando los datos solicitados o ejecutando la acción requerida. El ciclo de pregunta-respuesta sigue un formato establecido, donde el Cliente envía una consulta que incluye la dirección IP asignada al dispositivo, el código de función Modbus que establece la acción solicitada y los datos necesarios, a esto se le denomina trama. La respuesta del servidor confirma la acción tomada y puede incluir datos adicionales o un mensaje de error en caso de problemas.

Las razones preponderantes que han consolidado el uso de Modbus en el sector de la industria sobre otros protocolos de comunicación son las siguientes: Modbus se concibió considerando específicamente su aplicación en entornos industriales, lo que lo hace altamente adaptable a las necesidades de este sector; su accesibilidad, al ser un protocolo público y gratuito, lo posiciona como una opción atractiva para diversos sectores industriales; la simplicidad y facilidad de implementación, requiere un desarrollo mínimo, lo que simplifica su adopción en sistemas industriales; Modbus destaca por su capacidad para gestionar bloques de datos sin imponer limitaciones, brindando flexibilidad en el intercambio de información; posibilita el control de una amplia red de dispositivos, tales como un sistema de medición de humedad y temperatura. Este a su vez permite una comunicación eficiente hacia un ordenador, como también se puede emplear una conexión entre una unidad remota (RTU) y una estación de ingeniería, en sistemas SCADA.

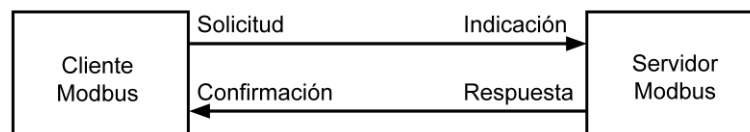
Sin embargo, el protocolo Modbus tiene algunas limitaciones, tal y como afirman Sanchis et al., (2010) en una red local de dispositivos, únicamente se puede asignar un rol de cliente, mientras que los dispositivos adicionales se asignan como servidores, lo que implica que solo un dispositivo, el cliente, tiene acceso a los datos en tiempo real de los valores de los sensores transmitidos por los servidores. Los servidores no pueden comunicarse directamente entre ellos. Como también Ruiz Olaya et al., (2024) mencionan que cada solicitud se transmite mediante el protocolo TCP a través del puerto designado 502 y generalmente emplea una comunicación en modo Half-Duplex a través de una conexión establecida

A pesar de estas restricciones, Modbus goza de una amplia difusión y es reconocido por numerosos fabricantes y usuarios como un estándar en comunicaciones industriales, gracias a sus capacidades comprobadas (Sanchis et al., 2010).

Toda solicitud Modbus incluye la dirección del dispositivo destinatario de la orden, lo que implica que cada dispositivo en la red Modbus debe tener asignada una dirección IP única. Por lo general, cada uno de los dispositivos son receptores de la trama, pero solo el servidor destinatario está en la disposición de ejecutarla.

Adicionalmente, este protocolo se alinea con las normas de cableado estructurado ANSI/EIAT/TIA 568A y 568B, la cual define las diversas topologías de red, distancia máxima del cableado, rendimiento de los componentes, como también la clase de tomas y conectores a usar.

La comunicación a través de Modbus TCP se realiza en parejas; un dispositivo debe inicializar una solicitud y esperar por una respuesta. Por lo tanto, la comunicación Cliente/Servidor empleando Modbus TCP está basada en cuatro tipos de mensajes (Borja Calvo, 2019).

**Figura 3***Esquema Cliente/Servidor en Modbus*

*Nota.* El esquema representa los cuatro mensajes que toma el sistema de comunicación Modbus entre el cliente y el servidor TCP. Tomado de Schneider Electric (2020).

En la Figura 3 se observa el protocolo Modbus para la comunicación TCP, donde se evidencian los mensajes necesarios según Borja Calvo (2019): “Solicitud: Mensaje enviado por el cliente para iniciar la comunicación; Indicación: Mensaje de petición recibido por el servidor; Respuesta: Mensaje de respuesta enviada por el servidor; Confirmación: Mensaje de respuesta recibido por el cliente” (p. 34).

La implementación de Modbus TCP/IP y Modbus RTU dentro del protocolo de comunicación Modbus incluye funciones que definen un estándar para realizar diversas formas de operaciones de lectura, escritura y control de datos entre dispositivos, como clientes y servidores, las principales funciones para el modelo TCP/IP son:

**Función 01 (Read Coil Status):** Permite la lectura del estado de una o más bobinas en un dispositivo esclavo. Estas bobinas suelen representar salidas binarias, ya sea activadas o desactivadas.

**Función 02 (Read Input Status):** Al igual que la función 01, se encarga de la lectura del estado de las entradas en un dispositivo esclavo. Estas entradas pueden representar diversas señales, como interruptores, sensores, entre otros.

Función 03 (Read Holding Registers): Esta función facilita la lectura de los valores almacenados en los registros de retención de un dispositivo esclavo. Estos registros comúnmente contienen información como datos analógicos, configuraciones de dispositivos, entre otros.

Función 04 (Read Input Registers): Similar a la función 03, pero lee datos de registros de entrada en un dispositivo esclavo. Estos registros a menudo almacenan información de estado que no puede ser modificada.

Función 05 (Write Single Coil): Para activar o desactivar una salida, esta función posibilita cambiar el estado de una sola bobina en un dispositivo esclavo.

Función 06 (Write Single Register): Permite escribir un valor único en un registro de retención en un dispositivo esclavo. Esto se utiliza, por ejemplo, para configurar parámetros en un dispositivo.

Función 15 (Write Multiple Coils): Esta función posibilita la alteración simultánea del estado de múltiples bobinas en un dispositivo esclavo.

Función 16 (Write Multiple Registers): Esta función propicia la escritura de múltiples valores en varios registros de retención en un dispositivo esclavo, todo en una sola operación.

## Tabla 1

### *Funciones de Modbus*

<b>Código de función</b>	<b>Nombre de la función</b>
<b>01</b>	Lectura de n bits de salida o internos
<b>02</b>	Lectura de n bits de entrada
<b>03</b>	Lectura de n bits de salida o internos
<b>05</b>	Escritura de 1 bit
<b>06</b>	Escritura de 1 palabra
<b>08</b>	Datos de diagnóstico de Modbus

<b>15</b>	Escritura de n bits
<b>16</b>	Escritura de n palabras

*Nota.* Se visualizan las funciones admitidas por diferentes dispositivos que implementan comunicación Modbus. Adaptado de Schneider Electric (2020).

### **2.3 Expansión de entradas y salidas en PLC**

La expansión de entradas y salidas en un PLC se refiere a la capacidad de aumentar la cantidad de dispositivos externos que podrían ser controlados o monitoreados por el PLC. Los PLCs tienen una cantidad limitada de entradas y salidas incorporadas, y la expansión se vuelve esencial cuando se requiere controlar sistemas más grandes y complejos.

Las limitaciones tradicionales de los PLC en términos de entradas y salidas se relacionan con la cantidad fija de dispositivos que el PLC puede manejar internamente. Estas limitaciones pueden incidir en la capacidad del PLC para controlar sistemas más extensos o para integrarse con un mayor número de sensores y actuadores.

La necesidad de ampliar las capacidades de entrada/salida en un PLC surge cuando los sistemas a controlar son más grandes o complejos de lo que las entradas/salidas internas del PLC pueden manejar. Esto puede involucrar la supervisión y el control de más sensores, actuadores y dispositivos en un sistema industrial o automatizado. El uso de protocolos de comunicación de campo, como PROFIBUS o Modbus, permite la conexión de dispositivos externos al PLC a través de una red, facilitando la expansión de las capacidades de entrada/salida.

Las entradas analógicas en un PLC permiten medir y procesar señales analógicas que varían de manera continua en lugar de estar en un estado discreto. Mientras que las entradas digitales solo pueden tener dos estados (alto o bajo, 1 o 0), las entradas analógicas pueden representar una gama completa de valores dentro de un rango determinado.

Las entradas analógicas pueden aceptar señales de voltaje o corriente que varían continuamente en lugar de tener solo dos niveles distintos. La resolución de una entrada analógica se refiere a la capacidad del PLC para discriminar pequeños cambios en el nivel de la señal analógica. Cada entrada analógica tiene un rango específico en el cual puede operar. Por ejemplo, una entrada de tipo analógica puede tener valores entre 0 a 10 voltios o de 4 a 20 mA.

Las señales analógicas deben convertirse a valores digitales antes de que el PLC pueda procesarlas. Esto se logra mediante un conversor de señal analógica a digital (ADC, por sus siglas en inglés), que transforma una señal de tipo analógica en un valor digital que el PLC puede entender. Las entradas analógicas son comúnmente utilizadas en aplicaciones donde se requiere medir y controlar variables continuas, como en sistemas de control de procesos industriales.

A diferencia de las señales analógicas, que pueden representar un rango continuo con diferentes valores, las señales de tipo digital en un PLC hacen referencia a entradas o salidas que representan información en forma de estados discretos, típicamente en términos de "0" y "1" o "alto" y "bajo". Estos estados discretos son adecuados para representar condiciones como encendido/apagado, abierto/cerrado o activo/inactivo.

Las señales digitales pueden ser tanto de entrada como de salida. Las entradas digitales reciben señales desde dispositivos externos, como interruptores, sensores o botones. Las salidas digitales envían señales a dispositivos externos, como relés, luces, motores, entre otros.

Las señales digitales se muestrean y procesan en ciclos de escaneo regulares del PLC. Durante cada ciclo, el PLC lee las entradas digitales, ejecuta la lógica programada y actualiza las salidas digitales. Estas son rápidas de procesar, lo que las hace ideales para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida a cambios en las condiciones del sistema.

En la programación de PLC, las señales digitales se suelen representar mediante bits. Cada bit puede ser una entrada o salida digital específica y se manipulan en el programa del PLC.

## **2.4 Amplificador operacional (OpAmp)**

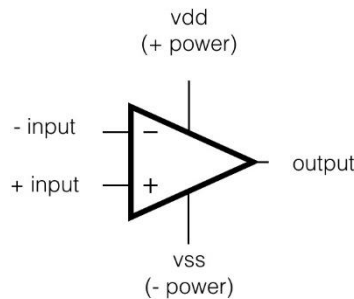
Este es un dispositivo electrónico que se caracteriza por amplificar la diferencia de potencial entre dos señales de entrada. Se utiliza principalmente en circuitos electrónicos que realizan operaciones matemáticas tales como sumas, restas, multiplicaciones, divisiones, integraciones y derivaciones. Los amplificadores operacionales tienen una alta ganancia de voltaje, la impedancia de entrada suele ser bastante alta y la impedancia de salida tiende a ser baja, lo que los hace deseables para una amplia gama de aplicaciones electrónicas, como en amplificadores de audio, filtros, osciladores, comparadores, entre muchos más.

El amplificador operacional está compuesto por un circuito interno de tres conexiones: dos de entrada y una de salida, las cuales son:

**Entrada no inversora (+):** Es una de las conexiones de entrada. Cuando el nivel de voltaje de la entrada no inversora supera el nivel de voltaje de la entrada inversora se obtiene en el amplificador operacional una señal de salida positiva.

**Entrada inversora (-):** Otra puerta de entrada. Aquí, la tensión se cambia antes de que se procese.

**Salida:** La tercera conexión es donde se amplifica o modifica la señal.

**Figura 4***Amplificador operacional*

*Nota.* Diagrama general de un amplificador operacional. Tomado de IPSON.nl (s.f.).

El amplificador operacional posee configuraciones básicas y/o típicas, dependiendo para la aplicación que este se desee, comúnmente las más implementadas son: inversor y diferencial.

Cuando el amplificador operacional se encuentra en configuración no inversora, la señal de entrada se conecta al terminal no inversor (+) del dispositivo, mientras que una parte de la salida amplificada se retroalimenta al terminal inversor (-) mediante de una red con valores específicos de resistencias. Esta configuración genera una ganancia positiva y la señal de salida se encuentra en la misma fase que la señal de entrada. Esta configuración es comúnmente utilizada en aplicaciones que requiere una ganancia estable y precisa, como en amplificadores de audio de alta fidelidad y en circuitos de instrumentación.

Para una configuración de amplificador diferencial se utilizan dos señales de entrada diferenciales mientras rechaza cualquier componente común a ambas señales. Este tipo configuración de amplificador se implementa comúnmente en aplicaciones donde se necesita medir o amplificar la diferencia entre dos señales, como en sistemas de instrumentación, comunicaciones diferenciales y en circuitos de control. El amplificador diferencial proporciona una alta ganancia a la señal diferencial y rechaza eficazmente el ruido común presente en ambas

señales de entrada, lo que lo hace ideal para entornos donde la precisión y la inmunidad al ruido son críticas.

## **2.5 Regulador de voltaje**

Los reguladores de voltaje son dispositivos esenciales en la electrónica de potencia y en la alimentación de sistemas eléctricos. Su principio de funcionamiento radica en mantener un voltaje de salida constante, aunque se presenten variaciones en el voltaje de entrada y las cargas que se encuentren conectadas al sistema. Para lograr este propósito, existen dos tipos principales de reguladores: los lineales y los conmutados.

Los reguladores lineales ajustan el voltaje de salida mediante dispositivos de regulación activa, como transistores, siendo ideales para aplicaciones de baja potencia y donde se requiere un bajo nivel de ruido en la salida. Por otro lado, los reguladores conmutados emplean técnicas de conmutación para controlar la energía entregada a la carga, siendo más eficientes en términos de energía para aplicaciones de alta potencia.

Estos dispositivos pueden utilizar una variedad de componentes, como transistores, diodos, inductores y capacitores, dependiendo de la topología del circuito. Las topologías comunes incluyen reguladores lineales tipo serie, reguladores lineales tipo paralelo, convertidores buck, boost y buck-boost para los reguladores conmutados.

Entre las características de rendimiento más importantes se encuentran la regulación de carga, la regulación de línea, la eficiencia, la respuesta transitoria, el rizado de salida, la estabilidad y la protección contra sobre corriente, sobretensión y cortocircuitos.

Los reguladores de voltaje se emplean en una amplia gama de aplicaciones, desde fuentes de alimentación de equipos electrónicos hasta sistemas de alimentación de energía en la industria, la electrónica de consumo y la electrónica automotriz.

En el mercado existen numerosos fabricantes de reguladores de voltaje, como Texas Instruments, Analog Devices, ON Semiconductor y STMicroelectronics, que ofrecen una variada oferta de productos con diferentes características y especificaciones para satisfacer las necesidades de diversas aplicaciones.

## **2.6 Sensores de 4 – 20 mA**

También denominados lazos de corriente estándar o lazos de corriente industrial. Representan un estándar ampliamente utilizado en la instrumentación y el control de procesos industriales. Estos sistemas de lazos de corriente ofrecen una manera robusta y confiable de transmitir información de medición y control entre dispositivos en entornos industriales adversos.

La premisa fundamental de los lazos de corriente de 4 a 20 mA es que la corriente que fluye a través del circuito es directamente proporcional a la magnitud de la variable medida. Por lo general, se asigna un valor de 4 mA al mínimo de la escala y 20 mA al máximo de la escala. Esta configuración garantiza una corriente de bucle mínima para la detección de fallas en el cableado o los dispositivos, mientras que el rango de 4 a 20 mA abarca el rango completo de medición de la variable controlada.

Los dispositivos que operan con lazos de corriente de 4 a 20 mA incluyen transmisores de nivel, transmisores de presión, transmisores de caudal, transmisores de temperatura y otros dispositivos de medición y control. Estos dispositivos convierten la magnitud de la variable medida

en una corriente de bucle proporcional, que luego se interpreta en un controlador o sistema de adquisición de datos.

Una de las principales ventajas de los lazos de corriente de 4 a 20 mA es su inmunidad al ruido eléctrico y la capacidad de resistir la interferencia electromagnética, lo que los convierte en una opción ideal para entornos industriales con alta interferencia y ruido. Además, permiten una conexión en bucle simple y económica, ya que solo se necesitan dos cables para la transmisión de datos y la alimentación del dispositivo.

En la industria, los lazos de corriente de 4 a 20 mA se utilizan en diversas aplicaciones, como la monitorización y control de procesos químicos, la supervisión de equipos industriales, el control de válvulas y actuadores, y la adquisición de datos en sistemas de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés) y sistemas SCADA

## **2.7 Optoacoplador**

Un optoacoplador, también llamado aislador óptico, es un dispositivo que integra un componente emisor de luz, comúnmente un diodo emisor de luz, junto con un componente fotosensible, típicamente un fotodiodo o un fototransistor. Un optoacoplador se utiliza principalmente para aislar eléctricamente dos circuitos al transmitir señales a través de la luz en lugar de la corriente eléctrica directa. Este tipo de componente es esencial en aplicaciones donde se requiere un alto grado de aislamiento eléctrico para proteger circuitos sensibles o para evitar bucles de tierra. Funciona de tal forma que cuando se suministra corriente al emisor de luz, este se enciende y emite luz. Esta luz atraviesa la barrera de aislamiento y alcanza el detector de luz. Al detectar la luz, el detector se activa y permite el flujo de corriente a través de él. Así, el

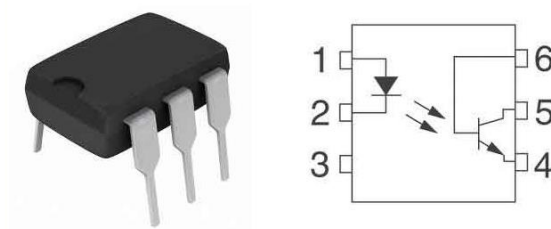
optoacoplador funciona como un interruptor óptico que regula la transferencia de señales o datos entre ambos circuitos.

En la industria, los optoacopladores son componentes comunes en sistemas de control y automatización, sistemas de seguridad industrial, equipos médicos, fuentes de alimentación conmutadas, interfaces de comunicación y muchos otros dispositivos electrónicos.

Los principales tipos de optoacopladores incluyen fotodiodos, fototransistores, fotodarlington, y acopladores ópticos integrados (optoacopladores en un solo chip). Cada tipo tiene sus propias características de rendimiento y aplicaciones específicas, lo que permite una amplia variedad de opciones para diseñadores de sistemas y fabricantes de equipos.

### Figura 5

*Esquema de un optoacoplador*



*Nota: Esquema de un Optoacoplador 4N25. Tomado de Joan (2024).*

## 2.8 Módulo ESP-32

El módulo [ESP-32](#) es un sistema en chip (SoC) desarrollado por Espressif Systems, el cual combina un microcontrolador de 32 bits con una unidad de procesamiento de señal digital (DSP, por sus siglas en inglés). Este microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento ofrece

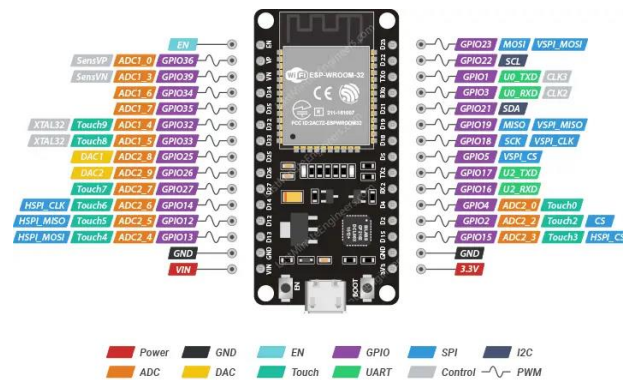
conectividad Wi-Fi y Bluetooth, así como una amplia variedad de interfaces de entrada y salida, todo integrado en un solo chip (Espressif Systems, 2024).

En cuanto a sus aplicaciones, el módulo ESP-32 es ampliamente implementado en proyectos que tienen que ver con el Internet de las Cosas (IoT), permitiendo así la recopilación de datos de sensores, el control de dispositivos y la comunicación con servicios en la nube, este a su vez también encuentra aplicación en la automatización industrial, usado para monitorear y controlar máquinas, sensores y actuadores, y en la electrónica de consumo, donde puede usarse en dispositivos de domótica, wearables y otros productos electrónicos.

Entre sus ventajas se destaca la presencia de una comunidad activa de desarrolladores que facilita el aprendizaje y la resolución de problemas. Además, el ESP-32 se programa utilizando el IDE de Arduino, lo que lo hace accesible incluso para principiantes en la programación.

## Figura 6

### *Pinout ESP32 DevKIT V1*



*Nota.* Detalle de pines y funcionalidades del módulo ESP32 DevKit V1. Tomado de Last Minute Engineers (2024).

### **3. Metodología**

El diseño e implementación de un prototipo para la expansión de entradas digitales y analógicas en un PLC con comunicación Modbus tiene un claro enfoque práctico y busca ofrecer una solución directa a un problema concreto en el ámbito de la automatización industrial. Desde la investigación aplicada, donde la finalidad es la generación de conocimiento aplicable y útil en situaciones prácticas para resolver problemas específicos. Incorpora y aplica conocimientos previos, pero con un enfoque en la resolución de problemas específicos en lugar de la generación pura de conocimiento teórico, donde busca generar resultados tangibles, como productos, procesos o prototipos, que puedan implementarse en entornos reales conectada con la realidad empírica, buscando soluciones que tengan un impacto directo en situaciones o contextos concretos.

Por lo general, los resultados de la investigación aplicada son directamente aplicables a situaciones del mundo real y a menudo buscan mejorar procesos, productos o sistemas existentes que involucran la colaboración con actores prácticos, como industrias, empresas u organizaciones, para entender sus necesidades y aplicar soluciones directamente relevantes. Lo anterior permite que siempre haya ciclos de mejora continua, donde los resultados se perfeccionan a medida que se implementan y se obtienen retroalimentaciones prácticas.

El desarrollo de este proyecto sigue un enfoque estructurado que abarca desde la concepción del diseño hasta la implementación y validación del prototipo. A continuación, se describe la metodología empleada, dividida en dos fases principales: el diseño conceptual y las fases de la investigación.

### 3.1 Diseño conceptual

El diseño conceptual de la tarjeta electrónica se fundamenta en los objetivos específicos del proyecto y en las funcionalidades requeridas para su correcto funcionamiento. En esta etapa, se definen los aspectos clave del diseño para guiar el desarrollo del prototipo.

El corazón de la tarjeta electrónica corresponde a un microcontrolador ESP32, elegido por su versatilidad y potencia de procesamiento. La ESP32, además de su capacidad de procesamiento, cuenta con funcionalidades de conectividad integradas, como Bluetooth y Wi-Fi, que permiten una comunicación inalámbrica eficiente. El microcontrolador ESP32 será programado utilizando el IDE Arduino, lo que facilita el desarrollo y la depuración del código.

La tarjeta electrónica debe contar con 2 salidas digitales y 2 analógicas, así como 2 entradas digitales y 2 analógicas, proporcionando una interfaz entre los dispositivos externos y el microcontrolador. Estas características permitirán una amplia gama de aplicaciones y la interacción con sensores y actuadores en un entorno industrial.

Se requiere una sección de fuente de alimentación que convierta la entrada de energía, usualmente de 12V o 24V a niveles de 5V y 3.3V adecuados para los componentes de la tarjeta.

Para la comunicación con el PLC, se implementa el protocolo Modbus TCP/IP a través de la conexión Wi-Fi. Esto permitirá una integración fluida con el software TIA Portal, utilizado para la programación del PLC. La selección de este protocolo se basa en su robustez y amplia aceptación en entornos industriales, así como en la capacidad de la ESP32 para soportar conexiones Wi-Fi.

El diseño de la tarjeta se lleva a cabo utilizando las plataformas de diseño EasyEDA y Proteus. EasyEDA proporciona una interfaz intuitiva para la creación de esquemas y circuitos

electrónicos, mientras que Proteus permitirá simular el funcionamiento del circuito antes de la implementación física, asegurando así su correcto funcionamiento.

La arquitectura de la tarjeta se divide en varias secciones, que corresponden a las entradas, salidas, la sección de fuente de alimentación y el microcontrolador. Se diseñará una interfaz clara entre estas secciones para garantizar un funcionamiento adecuado y una comunicación efectiva entre los componentes.

Es así como se proporciona una visión general del prototipo de la tarjeta electrónica, estableciendo los fundamentos para su desarrollo y asegurando su compatibilidad y funcionalidad con el entorno industrial deseado.

### 3.2 Fases de la investigación

El desarrollo de la investigación abarca la ejecución de tres fases que a su vez dan respuesta a cada uno de los objetivos específicos:

**Fase 1: Diseño de la tarjeta electrónica:** En esta fase se realiza el diseño esquemático del circuito y la tarjeta electrónica basada en microcontrolador ESP32 que permita manejar entradas y salidas análogas/digitales a implementar con el apoyo del software de uso libre EasyEDA. Con el fin de obtener un estimado del funcionamiento real de los circuitos a implementar en la tarjeta electrónica, es de gran utilidad el software Proteus, licencia facilitada por la E3T, adscrita a la UIS.

**Fase 2: Selección de componentes:** Aquí se presenta un estudio de los diferentes elementos electrónicos requeridos para la construcción de la tarjeta electrónica, basado en criterios económicos, de disponibilidad y compatibilidad, para esto, se usará el sitio web del comercio de componentes electrónicos JLCPCB.

**Fase 3: Implementación y pruebas de la tarjeta:** Esta fase permitirá realizar la fabricación y conexión física de los componentes electrónicos; el desarrollo del código de programación del PLC con TIA Portal, así como la programación de la tarjeta electrónica basada en microcontrolador ESP32 mediante el IDE Arduino; como también realizar las pruebas necesarias y validación del prototipo en condiciones prácticas, para realizar los correctivos a los que haya lugar para el buen funcionamiento de la tarjeta electrónica.

El fabricante seleccionado corresponde al sitio web del comercio JLCPCB, y las pruebas de validación tienen lugar en las instalaciones del Laboratorio de Automatización, adscrito a la E3T de la Universidad Industrial de Santander.

#### **4. Ejecución y resultados del proyecto**

En esta sección se detalla la ejecución del proyecto y se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases de investigación definidas previamente. Se describe el proceso seguido para llevar a cabo el diseño, selección de componentes e implementación y validación de la tarjeta electrónica diseñada para mejorar la capacidad operativa de un PLC mediante un expansor de entradas y salidas digitales/analógicas. Cada fase se aborda de manera individual, comenzando por el diseño esquemático y avanzando hacia la implementación práctica y la validación de la solución propuesta. A continuación, se presentan en detalle los pasos seguidos y los resultados obtenidos en cada fase del proyecto.

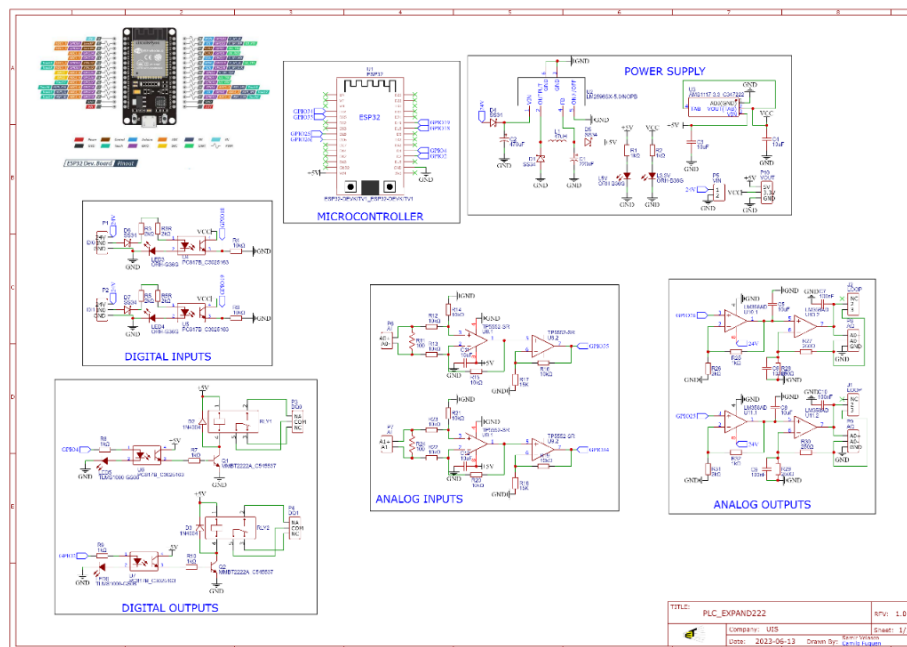
##### **4.1 Fase 1: Diseño de la tarjeta electrónica**

En esta etapa fase del proyecto, se procedió al diseño detallado de la tarjeta electrónica destinada a funcionar como expansor de entradas y salidas para el PLC. El propósito fundamental

de esta fase fue establecer las especificaciones técnicas y funcionales del dispositivo, así como definir su arquitectura general y específica. El proceso se inició con un análisis exhaustivo de los requisitos del sistema estipulados en el diseño conceptual, incluyendo el número requerido de entradas y salidas digitales y analógicas, así como los protocolos de comunicación compatibles con el PLC objetivo. Utilizando esta información como base, se procedió a diseñar el esquemático del circuito utilizando el software especializado [EasyEDA](#) (2024).

**Figura 7**

*Circuito esquemático general*



*Nota.* La Figura 7 ilustra el [circuito esquemático](#) de manera general, en el cual puede visualizarse la arquitectura de la tarjeta electrónica prototipo, se divide en varias secciones, que corresponden a las entradas y salidas analógicas y digitales, la sección de fuente de alimentación y el microcontrolador. Diseño elaborado en EasyEDA (2024).

El [archivo Gerber](#) correspondiente al diseño proyecto, se encuentran en el [repositorio digital del proyecto](#) o en el [sitio web](#) creado por los autores.

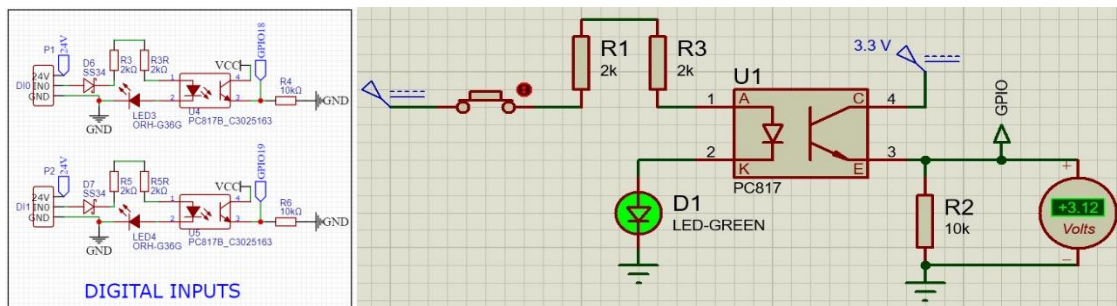
A continuación, se exponen los circuitos de las diferentes subsecciones específicas y su respectiva [simulación en el software Proteus](#), de Labcenter Electronics (2024).

#### 4.1.1 Circuito de entrada digital

El diseño del circuito de entrada digital se realiza para garantizar la correcta interacción entre los dispositivos externos y el microcontrolador, permitiendo la detección de señales digitales y su posterior procesamiento. En la Figura 8, se presenta una descripción detallada del diseño y funcionamiento de este circuito, destacando sus componentes principales y su integración en la tarjeta electrónica diseñada.

**Figura 8**

*Circuito de entrada digital*



*Nota.* El circuito esquemático y su respectiva simulación corresponden a la Entrada Digital, cuenta con componentes clave como un aislador acoplado ópticamente, y un indicador luminoso. Diseño elaborado en EasyEDA (2024) y simulado en Proteus (Labcenter Electronics, 2024).

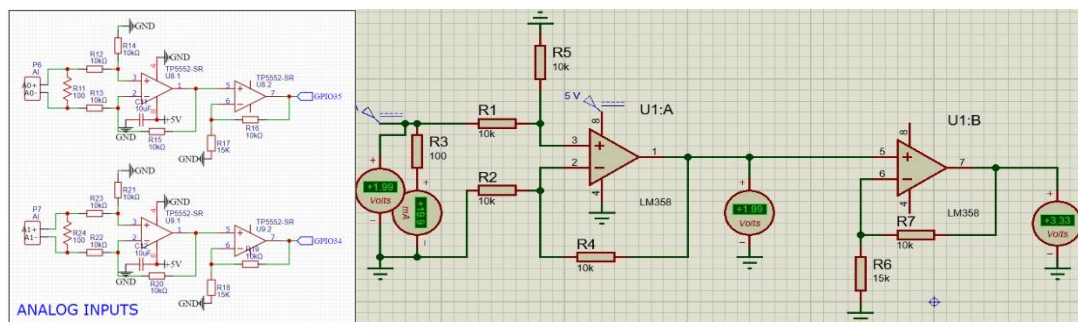
El circuito de entrada digital corresponde a un optoacoplador, conectado en serie a una resistencia de 4 k[Ω]. Para efectos de disipación de potencia y de corriente adecuada para el indicador luminoso, se construye en su configuración equivalente en serie: dos resistencias de 2 k[Ω]. El emisor óptico entre pines 1 y 2, enviará una señal al detectar el paso de la corriente, y esto podrá reflejarse en un indicador luminoso, que corresponde a un LED de color verde. Cuando la señal óptica es detectada por el receptor, los pines 4 y 3 permitirán el paso de corriente a la resistencia de 10 k[Ω] enviando así una señal digital de 3,3 [V] al pin correspondiente del microcontrolador ESP32.

#### 4.1.2 Circuito de entrada analógica

El diseño del circuito de entrada analógica es fundamental para la conversión precisa de señales analógicas provenientes de sensores externos en valores digitales procesables por el microcontrolador. Se detallan los principales componentes en el diseño y funcionamiento del circuito, así como su integración en la tarjeta electrónica diseñada para garantizar su correcto desempeño en aplicaciones industriales.

**Figura 9**

*Circuito de entrada analógica*

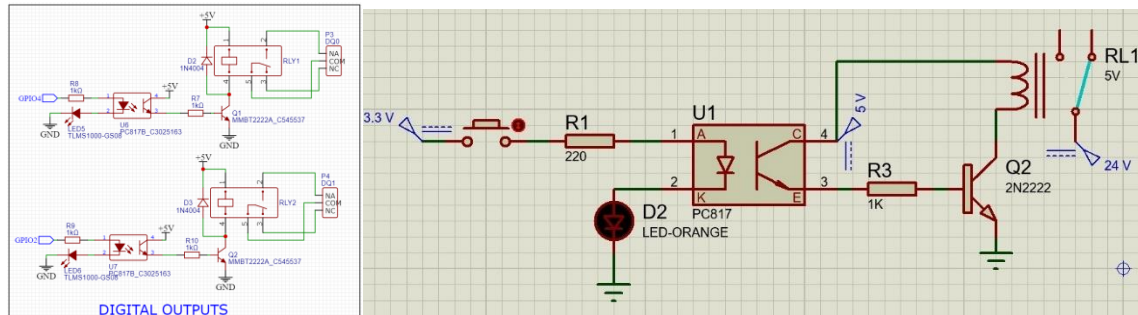


*Nota.* El circuito esquemático y su respectiva simulación corresponden a la Entrada Analógica, cuenta con componentes clave como dos amplificadores operacionales, en una configuración específica. Diseño elaborado en EasyEDA (2024) y simulado en Proteus (Labcenter Electronics, 2024).

El circuito de entrada analógica corresponde a un conversor de corriente a voltaje, que convierte una señal de 0 a 20 m[A] a una señal entre 0 a 3,3 [V]. El circuito cuenta con una etapa de amplificador operacional en configuración diferencial, y otra etapa integrada a la anterior en configuración no inversora. Esto con un arreglo de resistencias de precisión, que logra realizar una adecuación de la señal de corriente a una señal de voltaje, que pueda ser procesada por el microcontrolador mediante un conversor análogo a digital (ADC) de 12bits, el cual ya se encuentra integrado en la infraestructura del módulo ESP32, con una resolución de 3.3 [V] / 4096 unidades, equivalente a 0.8 m[V] por paso. Garantizando la compatibilidad e integración de la tarjeta electrónica con dispositivos externos de tipo industrial que usualmente arrojan sus mediciones mediante un lazo de corriente de 4 a 20 m[A].

#### ***4.1.3 Circuito de salida digital***

El circuito de salida digital desempeña un papel crucial en la operación del prototipo, ya que se encarga de generar señales digitales que controlan dispositivos externos. Este circuito es el encargado de generar señales discretas de voltaje que representan estados lógicos binarios, como 0 y 1.

**Figura 10***Circuito digital de salida*

*Nota.* El circuito esquemático y su respectiva simulación corresponden a la salida digital, cuenta con dispositivos electrónicos clave, como transistores y relés, que se activan o desactivan para producir niveles de voltaje discretos. Diseño elaborado en EasyEDA (2024) y simulado en Proteus (Labcenter Electronics, 2024).

El circuito de salida digital corresponde a un optoacoplador, conectado en serie a una resistencia de 220  $[\Omega]$ . El emisor óptico entre pines 1 y 2, enviará una señal al detectar el paso de la corriente, y esto podrá reflejarse mediante un indicador luminoso, que corresponde a un LED de color rojo. Cuando la señal óptica es detectada por el receptor, los pines 4 y 3 permitirán el paso de corriente a la resistencia de 1 k $[\Omega]$ , activando así el transistor que permite el paso de la corriente en el bobinado de un relé. Este relé una vez se ha energizado su bobinado, cambia de estado sus contactos normalmente abiertos y cerrados, lo cual permite controlar la activación y desactivación de cargas o dispositivos externos conectados a los pines del relé.

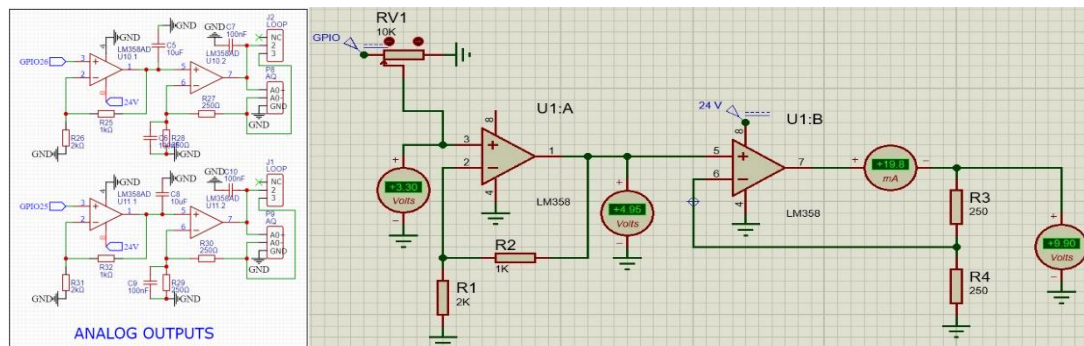
#### 4.1.4 Circuito de salida analógica

El circuito de salida analógica es una parte esencial de la tarjeta electrónica que permite la interfaz con dispositivos externos que requieren señales analógicas para su operación. Este

componente desempeña un papel fundamental al proporcionar una salida precisa y controlada de señales analógicas, permitiendo así la integración fluida con el entorno industrial y la interacción con dispositivos compatibles con tales señales.

**Figura 11**

*Circuito analógico de salida*



*Nota.* El circuito esquemático y su respectiva simulación corresponden fundamentalmente a dos amplificadores operacionales, en configuraciones específicas. Diseño elaborado en EasyEDA (2024) y simulado en Proteus (Labcenter Electronics, 2024).

El circuito de salida analógica corresponde a un convertor de voltaje a corriente, que convierte una señal de 0 a 3,3 [V] a una señal entre 0 a 20 m[A]. El circuito cuenta con dos etapas integradas que corresponden a dos amplificadores operacionales, en conexión con un arreglo de resistencias específicas en configuración no inversora. La tarjeta ESP32 contiene integrados dos canales de convertor digital a analógico (DAC) de 8 bits, lo que permite generar señales analógicas en dos canales independientes. Estos canales pueden generar hasta 256 valores de voltajes en el rango de 0 a 3.3 [V]. Con estas dos herramientas, se logra realizar la adecuación de la señal de voltaje a una señal de corriente, garantizando la compatibilidad e integración de la tarjeta

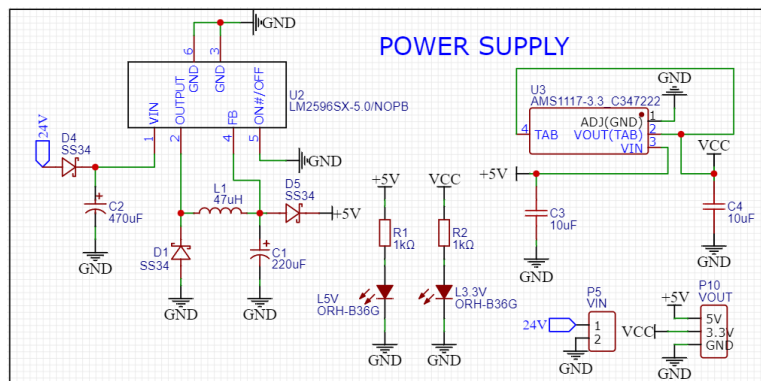
electrónica con dispositivos externos de tipo industrial que usualmente suministran sus mediciones con señales de corriente de 4 a 20 m[A].

#### 4.1.5 Circuito de alimentación

El Circuito de Alimentación es crucial para en el desarrollo del prototipo electrónico diseñado, ya que proporciona la energía necesaria para su funcionamiento. Mediante componentes como los reguladores fijos de voltaje, se adecúa una tensión de entrada de 24 [V] o 12 [V] a niveles óptimos para los subcircuitos electrónicos de la tarjeta, esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de todos los circuitos y módulos integrados a la tarjeta electrónica.

**Figura 12**

*Circuito de alimentación*



*Nota.* El esquemático del circuito de alimentación, corresponde a la fuente de poder que adecuará y brindará la energía necesaria a todos los subcircuitos y módulos integrados a la tarjeta electrónica. Diseño elaborado en EasyEDA (2024).

Este sistema de alimentación consiste principalmente en dos reguladores fijos, uno de 5 [V] y otro de 3,3 [V], los cuales se encuentran conexiados a diferentes arreglos de inductores y

capacitores, con el fin de brindar energía estable y adecuada a toda la tarjeta electrónica. Adicionalmente, cuenta con algunos diodos Schottky como medida de protección ante tensión inversa y contracorrientes, como también algunos indicadores luminosos LED de color azul, los cuales darán señal del correcto funcionamiento y suministro de energía a la tarjeta electrónica.

## 4.2 Fase 2. Selección de componentes

La selección de componentes debe guiarse por criterios económicos y de disponibilidad, factores que podrían influir en la modificación de ciertas especificaciones del diseño. Es importante destacar que las etapas de 4.2 Fase 2. Selección de componentes y de 4.1 Fase 1: Diseño de la tarjeta electrónica están estrechamente relacionadas, ya que las limitaciones económicas y la disponibilidad en el mercado pueden requerir ajustes en las características previamente establecidas. En la Tabla 2, se presenta la lista de materiales, con las características generales de los componentes electrónicos utilizados con información del fabricante, tipo de encapsulado, cantidad utilizada y precio. Anclado al nombre se redirecciona al sitio web JLCPCB con información adicional.

**Tabla 2**

### *Componentes seleccionados*

Name	Designator	Footprint	Qty	Manufacturer	Price
220uF	C1	CAP-SMD_BD6.3-L6.6-W6.6-FD	1	KNSCHA	0.03
470uF	C2	CAP-TH_BD10.0-P5.00-D1.0-FD	1	CX	0.073
10uF	C3, C4, C5, C8, C11, C12	C0603	6	SAMSUNG	0.005
100nF	C6, C7, C9, C10	C0603	4	SAMSUNG	0.003
SS34	D1, D4, D5, D6, D7	SMA_L4.2-W2.7-LS5.0-RD	5	YONGYUTAI	0.031
1N4004	D2, D3	SMA_L4.4-W2.8-LS5.4-RD	2	TWGMC	0.009
47uH	L1	IND-SMD_L12.0-W12.0_CDRH127XX	1	PROD	0.223
ORH-B36G	L3.3V, L5V	LED0603-RD	2	Orient	0.006
ORH-G36G	LED3, LED4	LED0603-R-RD	2	Orient	0.01

<b>TLMS1000</b>	LED5, LED6	LED0603-R-RD	2	VISHAY	0.106
<b>MMBT2222A</b>	Q1, Q2	SOT-23-3_L2.9-W1.3-P1.90-LS2.4-BR	2	UMW	0.018
<b>1kΩ</b>	R1, R2, R7, R8, R9, R10, R25, R32	R0805	8	UNI-ROYAL	0.002
<b>2kΩ</b>	R3, R3R, R5, R5R, R26, R31	R0805	6	UNI-ROYAL	0.002
<b>10kΩ</b>	R4, R6, R12, R13, R14, R15, R16, R19, R20, R21, R22, R23	R0805	12	UNI-ROYAL	0.001
<b>100</b>	R11, R24	R_AXIAL-0.4	2	CCO	0.01
<b>15K</b>	R17, R18	R0805	2	UNI-ROYAL	0.002
<b>250Ω</b>	R27, R28, R29, R30	RES-TH_BD2.4-L6.3-P10.30-D0.6	4	台湾双羽	0.009
<b>SRD-05VDC</b>	RLY1, RLY2	RELAY-TH_SRD-XXVDC-XL-C	2	松乐	0.333
<b>LM2596SX-5.0</b>	U2	TO-263-5_L10.2-W8.9-P1.70-TL	1	TI	1.551
<b>AMS1117-3.3</b>	U3	SOT-223-4_L6.5-W3.5-P2.30-LS7.0-BR	1	UMW	0.035
<b>PC817B</b>	U4, U5, U6, U7	OPTO-SMD-4_L4.6-W6.5-P2.54-LS10.3-TL	4	GOODWORK	0.048
<b>TP5552-SR</b>	U8, U9	SO-8_L4.9-W3.9-P1.27-LS5.9-BL	2	3PEAK	2.079
<b>LM358AD</b>	U10, U11	SOP-8_L4.9-W3.9-P1.27-LS6.0-BL	2	ST	0.379

*Nota.* Los precios se encuentran en dólares, la designación es la correspondiente al circuito esquemático general del diseño.

La lista de materiales de la Tabla 2 refleja el resultado de un proceso de selección de componentes cuidadosamente ejecutado. La selección final de los materiales se realizó considerando la funcionalidad requerida para el diseño de la tarjeta electrónica, la viabilidad económica del proyecto, la disponibilidad en el mercado, las especificaciones técnicas y la calidad de los componentes. Además, se priorizó la elección de proveedores confiables, siendo [JLCPCB](#) (2024) la plataforma web seleccionada para la compra de los componentes, garantizando así la buena calidad y oferta de los mejores fabricantes de componentes semiconductores. Esta decisión contribuye a asegurar la fiabilidad del prototipo.

### 4.3 Fase 3: Implementación y validación

La fase de implementación y validación del proyecto marca el punto culminante del proceso de desarrollo, donde el diseño conceptual cobra vida a través de la materialización de la tarjeta electrónica diseñada con los componentes seleccionados. En esta etapa, se lleva a cabo la fabricación y conexión física de los componentes electrónicos, así como la programación del PLC en el software [TIA Portal](#) (Siemens, 2024) y de la tarjeta electrónica basada en el microcontrolador ESP32 en el IDE Arduino. Además, se realizan algunas pruebas para verificar el correcto funcionamiento del prototipo en diversas condiciones prácticas del entorno industrial previsto.

#### 4.3.1 Enrutamiento de PCB y visualización digital

En esta etapa, se utiliza el software EasyEDA para trazar las rutas de conexión con pistas en cobre entre los componentes de la tarjeta electrónica. Durante el diseño y enrutamiento, se prestó especial atención a aspectos como la disposición de los componentes en la tarjeta, la distribución de las pistas de conexión y la integración de la sección de alimentación adecuada para garantizar un suministro de energía estable.

Para garantizar la integridad del diseño, se sigue un enfoque sistemático que comienza con la colocación y organización cuidadosa de los componentes en la placa. Posteriormente, se trazan las conexiones eléctricas utilizando las herramientas de enrutamiento disponibles en EasyEDA, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de cada componente “*footprint*” y las restricciones de diseño impuestas por el tamaño y la disposición de la placa.

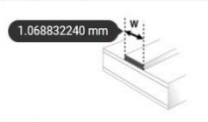
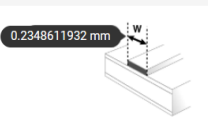
Durante el proceso de enrutamiento, se realizan múltiples iteraciones para optimizar la disposición de las pistas y minimizar las posibles interferencias entre ellas. Además, se emplean diferentes técnicas, como el enrutamiento en capas y el uso de planos de tierra.

Una vez completado el enrutamiento de PCB, se procede a la visualización digital del diseño mediante simulaciones y herramientas de análisis disponibles en EasyEDA. Esto permite verificar la integridad del diseño, identificar posibles problemas y realizar ajustes finales antes de la fabricación de la tarjeta electrónica.

Para establecer la regla de diseño en el enrutamiento. En la Figura 13 se observa el cálculo de ancho de trazas de PCB, se realizó mediante una herramienta del sitio web [DigiKey](#) (2024).

**Figura 13**

*Cálculo de ancho de trazas para PCB*

Corriente (I)	3	A	Corriente (I)	1	A
Esesor (t)	1	oz/ft <sup>2</sup>	Esesor (t)	1	oz/ft <sup>2</sup>
Ancho mínimo de traza			Ancho mínimo de traza		
					
Capas externas en el aire			Capas externas en el aire		
Ancho de traza requerido (W)			Ancho de traza requerido (W)		
1,068832240			0,2348611932		
mm			mm		
<b>FÓRMULA</b>					
Primero, calcule el Área: $A = \left( \frac{I}{k \times T_{Rise}} \right)^{\frac{1}{c}} \times b$			Para las capas internas de la IPC-2221: k = 0.024, b = 0.44, c = 0.725 Para las capas externas de la IPC-2221: k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725 donde k, b y c son constantes que resultan del ajuste de la curva a las curvas de la IPC-2221.		
Luego, calcule el Ancho: $W = \frac{A}{t \times 1.378}$			<b>Valores comunes:</b> Espesor: 1 oz Ambiente: 25 C Aumento de la temperatura: 10 C		

*Nota.* Cálculos realizados en el sitio web de [DigiKey](#) (2024).

**Figura 14**

*Regla de diseño utilizada*

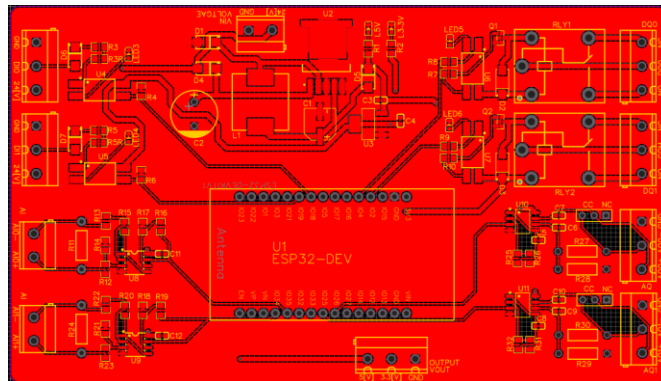
Rule	Track Width (min)	Clearance (min)
Default	0.3	0.1
Source	1	0.2

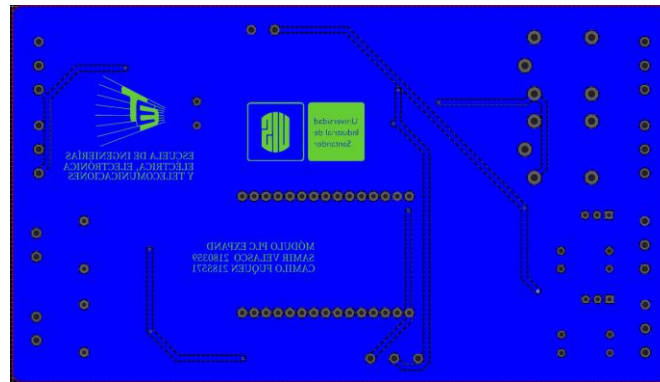
*Nota.* Datos ingresados en el software de diseño EasyEDA (2024).

En la Figura 15 y Figura 16 se visualizan respectivamente las capas superior e inferior de la tarjeta electrónica con el trazado de las pistas.

**Figura 15**

*Vista de capa superior*



**Figura 16***Vista de capa inferior*

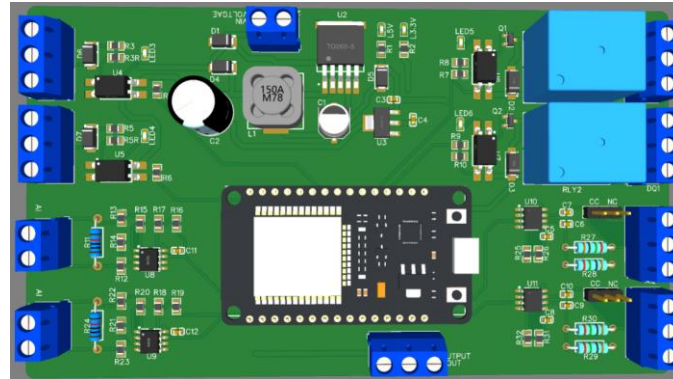
Nota. Se visualiza el enrutamiento en la capa inferior, adicionalmente se agregan algunos recursos estéticos y visuales en la capa serigráfica inferior. Esto es posible gracias a la interfaz gráfica del software de uso libre para diseño de circuitos electrónicos EasyEDA (2024).

La simulación visual de la estructura de los circuitos electrónicos ofrece una herramienta para mejorar la calidad del diseño, reducir costos y tiempos de desarrollo, y garantizar la funcionalidad y estética deseada del circuito. tiene diversas ventajas y aporta significativamente al proceso de diseño y desarrollo, pues es la forma de identificar posibles errores de diseño antes de la implementación física.

El software de uso libre EasyEDA también ofrece la posibilidad de visualizar el circuito en 3D, con lo cual se puede observar con alta fidelidad el resultado de una posible fabricación y ensamblaje de la tarjeta electrónica con los componentes seleccionados.

**Figura 17**

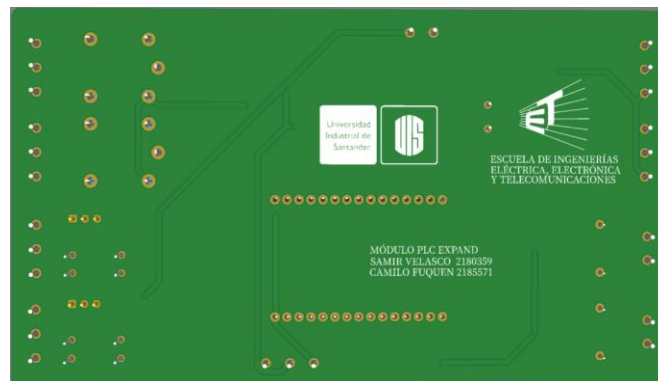
*Simulación 3D capa superior*



*Nota.* Se visualiza la simulación en 3D de la tarjeta electrónica en su capa superior, lo que permite visualizar digitalmente un fiel resultado real de la posterior fabricación y ensamblaje.

**Figura 18**

*Simulación 3D capa inferior*



*Nota.* Se muestra la simulación en 3D de la tarjeta electrónica en su capa inferior, lo que permite visualizar digitalmente un fiel resultado real de la posterior fabricación y ensamblaje.

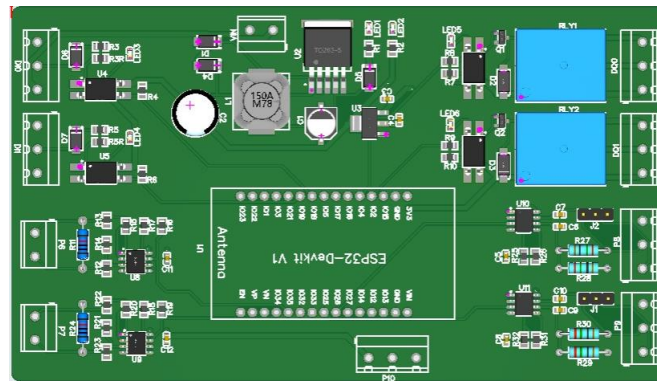
### 4.3.2 Fabricación y soldadura de componentes

En esta fase se procede a la fabricación física de la tarjeta electrónica diseñada utilizando los servicios de JLCPCB, un reconocido fabricante chino de circuitos impresos. JLCPCB ofrece procesos avanzados de fabricación que garantizan precisión y calidad del circuito impreso. Se utiliza el diseño realizado en EasyEDA para generar los archivos Gerber necesarios para la producción.

Una vez que JLCPCB fabrica el circuito impreso, se continúa con el proceso de soldadura de los componentes electrónicos en la tarjeta. Se siguen estrictamente las especificaciones del diseño para ubicar cada componente en su posición adecuada. La soldadura se realiza utilizando métodos estándar de soldadura por reflujo o soldadura manual, según sea necesario.

### Figura 19

*Esquema final de la tarjeta*



*Nota.* Visualización 2D del archivo Gerber definitivo enviado para fabricación a JLCPCB (2024).

Una vez transcurridos los tiempos de fabricación y ensamblaje de los componentes electrónicos. El diseño se ha materializado en un prototipo de tarjeta electrónica real y tangible.

La tarjeta electrónica puede visualizarse en la Figura 20 en sus capas superior e inferior con ensamblaje parcial.

### Figura 20

*Fabricación de la tarjeta electrónica*

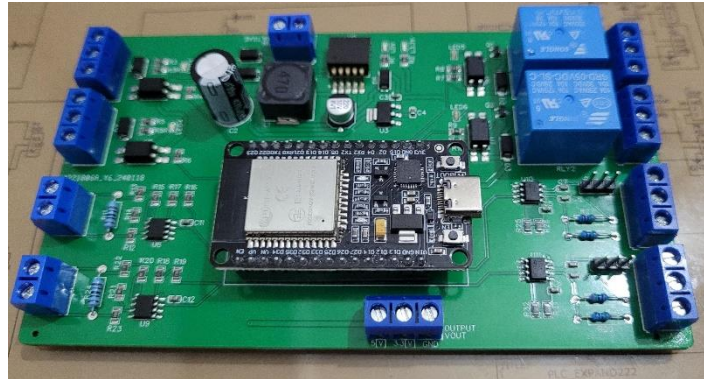


*Nota.* Resultado de la fabricación del esquema final enviado a JLCPCB. El producto se recibe en Colombia desde instalaciones en China, se debe tener en cuenta los costos aduaneros del país importador.

Los autores, realizaron la soldadura y ensamblaje parcial restante para el prototipo definitivo de la tarjeta electrónica, esto con el fin de adquirir y mejorar habilidades técnicas y conocimientos prácticos. Durante la soldadura, se llevan a cabo inspecciones visuales para garantizar la calidad de las conexiones y evitar posibles defectos. Se realizan pruebas de continuidad y resistencia para verificar la integridad eléctrica de cada conexión. La atención al detalle y la precisión en este proceso son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del prototipo en las siguientes etapas de validación y prueba.

**Figura 21**

*Resultado final tarjeta electrónica*



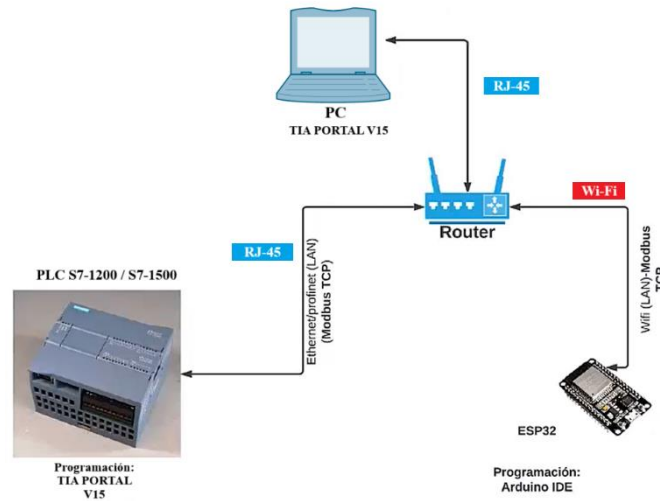
*Nota.* El resultado final de la fabricación de la tarjeta electrónica es fiel a la simulación 3D.

Con la fabricación y soldadura de componentes completadas con éxito, la tarjeta electrónica ha tomado forma física, representando el resultado tangible del diseño conceptual.

#### ***4.3.3 Conexión en red local TCP/IP***

Esta sección detalla el proceso de configuración de la red local, abordando aspectos como: la asignación de direcciones IP, la configuración de parámetros de red y la conexión de dispositivos. Se abordarán los aspectos particulares de la configuración necesarios para garantizar la interoperabilidad entre el PLC y la tarjeta electrónica, así como para asegurar una comunicación estable en el entorno industrial previsto.

La figura muestra que mediante el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP, se pueda conectar el PLC S7-1200 o PLC S7-1500 con programación en TIA Portal de modo que se pueda ampliar su capacidad de entradas y salidas de datos que permitan optimizar procesos industriales.

**Figura 22***Conexión en red local*

*Nota.* Diagrama de Conexión para red local TCP/IP, ESP32 mediante conexión inalámbrica. Un Router-Access Point permite la interconexión inalámbrica y por cable UTP – RJ45 con los demás dispositivos. Tomado de Talos Electrónico (2022).

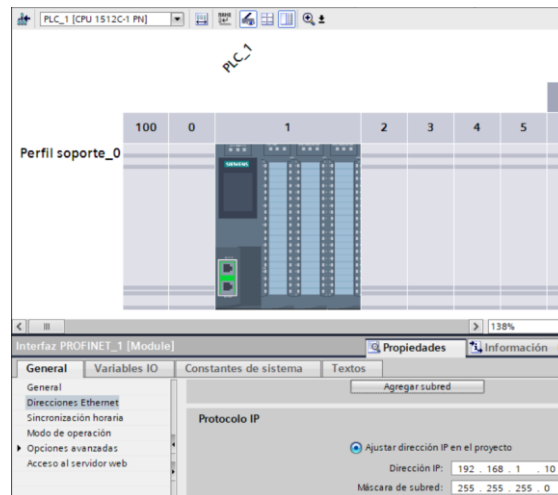
El Router Inalámbrico seleccionado corresponde al modelo [MW302R](#), de la marca MERCUSYS, el cual garantiza una conexión N multimodo a 300Mbps que proporciona conexiones rápidas, estables y cobertura amplia (MERCUSYS Technologies Co, 2024). Este dispositivo también se adapta a los requerimientos físicos de la red local, así como a los requerimientos económicos del proyecto.

Para crear la red local, se deben ajustar una serie de parámetros, en todos los dispositivos. Para este caso, se creará la red típica 192.168.1.0 por lo cual, el Router tendrá la IP correspondiente a Puerta de Enlace: 192.168.1.1. La conexión inalámbrica se puede personalizar a preferencia el nombre y protocolo de seguridad con contraseña. Para este caso, el SSID de la red inalámbrica se denomina PLC\_AP y no se asigna contraseña.

El PLC debe ser configurado en su puerto Profinet. Para lo cual, se aprovecha el software TIA Portal V15. Como primer paso, se debe crear un nuevo proyecto en el software, se selecciona la respectiva CPU del dispositivo PLC a utilizar y su versión de firmware correspondiente. Para este caso en específico, la CPU corresponde al modelo CPU 1512C-1 PN y versión 2.1. Una vez en la interfaz del programa, se da doble clic en el puerto de red, para configurar la dirección IP Estática del dispositivo PLC. La IP asignada al PLC corresponde a 192.168.1.10. Una vez realizada esta configuración, el PC y PLC se conectan por medio físico cableado UTP – RJ45 al Router [MW302R](#) para cargar el programa de configuración.

### Figura 23

#### *Ajuste de dirección IP del PLC en TIA Portal*



*Nota.* Configuración del PLC para que pueda formar parte de la red local de comunicación. Visualización en la interfaz en TIA Portal (Siemens, 2024).

Para la asignación de IP del PC y la ESP32 se ha configurado el Router para que asigne IP dinámica (DHCP) en el rango de las IP 192.168.1.100 en adelante, por lo cual, La PC se conecta

mediante cable UTP – RJ45 al Router [MW302R](#) en un puerto LAN disponible en primer lugar, asignándole inmediatamente la IP 192.168.1.100.

Posteriormente, mediante algunas líneas de [código en el IDE Arduino](#), en la que podría utilizarse el ejemplo “SimpleWiFiServer” de la librería esp32 de Espressif para IDE Arduino, también en configuración de IP Dinámica DHCP, una vez se conecte a la red inalámbrica del Punto de Acceso [MW302R](#), le asignará la IP inmediatamente posterior, la cual corresponde para la ESP32 la IP de 192.168.1.101

## Figura 24

*Configuración IP de ESP32 en IDE Arduino*

```
#ifndef ESP8266
#include <ESP8266WiFi.h>
#else //ESP32
#include <WiFi.h>
#endif
#include "ModbusIP_ESP8266.h"

void setup() {
  pinMode(18, INPUT);
  pinMode(19, INPUT);

  Serial.begin(115200);
  //Conectar con SSID de red local
  WiFi.begin("PLC_AP");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP()); //Mostrar IP asignada
}
```

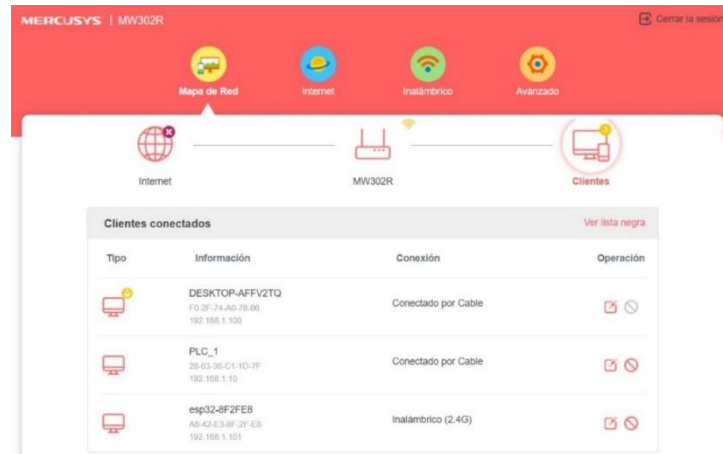
*Nota.* Líneas de [código en IDE Arduino](#) para la conexión inalámbrica mediante Wi-Fi de la ESP32 y la asignación de su IP dinámica en la red creada PLC\_AP, no se designó protocolo de contraseña en la red para el ejemplo. Código desarrollado en Arduino (2024) incluyendo la librería ModbusIP de Emelianov (2024).

Finalmente, una vez se han configurado y conectado todos los equipos, accediendo a la IP de la puerta de enlace 192.168.1.1 puede ingresarse al menú de configuración del Router, también

haciéndose posible observar la red local creada con los dispositivos conectados tanto de manera inalámbrica como cableada.

## Figura 25

### Visualización de red local



*Nota.* Accediendo a la IP para la configuración del Router como Puerta de Enlace desde la Computadora, se podrá visualizar la red local activa con los dispositivos conectados a la misma, pueden observarse las respectivas IP configuradas para el PLC, PC y ESP32. Interfaz gráfica del Router MERCUSYS (2024).

### 4.3.4 Desarrollo de códigos

En esta etapa se concentra el esfuerzo en la programación tanto del PLC como de la tarjeta electrónica basada en el microcontrolador ESP32, implementándose los algoritmos y la lógica de control necesarios para gestionar las entradas y salidas digitales y analógicas, así como para establecer la comunicación adecuada entre los dispositivos mediante el protocolo Modbus TCP/IP.

Debido a la limitación de la comunicación tipo Half-Duplex del protocolo de comunicación Modbus TCP/IP, significa que, si bien se puede establecer una comunicación bidireccional, esta

no puede ser simultánea en ambos sentidos, sino que debe configurarse un dispositivo como Cliente y otro como Servidor, por lo cual, se presentarán las programaciones para los dos casos: El caso ESP32 Cliente y PLC Servidor, y el caso PLC Cliente y ESP32 Servidor.

Para el PLC, se emplea el software TIA Portal, que ofrece un entorno de desarrollo intuitivo y potente para la programación de controladores Siemens. Se definen las funciones de lectura de datos a través del protocolo Modbus TCP/IP, estableciendo la comunicación con la tarjeta electrónica. Además, se configuran las señales de entrada y salida necesarias para interactuar con los dispositivos externos.

Por otro lado, en el IDE Arduino se escribe el código necesario para el microcontrolador ESP32, aprovechando las capacidades de conectividad Wi-Fi y Bluetooth integradas. Se implementan algoritmos para la gestión de las entradas y salidas digitales y analógicas, así como la lógica de comunicación con el PLC a través del protocolo Modbus TCP/IP. Esto es posible, gracias a la librería [ModbusIP\\_ESP8266](#) (Emelianov, 2024).

Según el [Manual de Sistema](#) STEP 7 y WinCC Engineering V16 elaborado por Siemens (2024):

La instrucción "MB\_SERVER" permite la comunicación como servidor Modbus TCP a través de una conexión PROFINET. La instrucción "MB\_SERVER" permite procesar solicitudes de conexión de un cliente Modbus TCP, recibir y procesar solicitudes de Modbus y enviar mensajes de respuesta (p. 9527).

**Tabla 3***Tabla de instrucciones Modbus en TIA Portal*

MB_MODE	MB_DATA_ADDR	MB_DATA_LEN	Función Modbus	Función y tipo de datos
0	De 1 a 9.999	De 1 a 2.000	01	Leer de 1 a 2.000 bits de salida en la dirección remota de 0 a 9.998
0	De 10.001 a 19.999	De 1 a 2.000	02	Leer de 1 a 2.000 bits de entrada en la dirección remota de 0 a 9.998
0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 40.001 a 49.999</li> <li>• De 400.001 a 465.535</li> </ul>	De 1 a 125	03	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leer de 1 a 125 registros de parada en la dirección remota de 0 a 9.998</li> <li>• Leer de 1 a 125 registros de parada en la dirección remota de 0 a 65.534</li> </ul>
0	De 30.001 a 39.999	De 1 a 125	04	Leer de 1 a 125 palabras de entrada en la dirección remota de 0 a 9.998
1	De 1 a 9.999	1	05	Escribir 1 bit de salida en la dirección remota de 0 a 9.998
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 40.001 a 49.999</li> <li>• De 400.001 a 465.535</li> </ul>	1	06	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escribir 1 registro de retención en la dirección remota de 0 a 9.998</li> <li>• Escribir 1 registro de retención en la dirección remota de 0 a 65.534</li> </ul>
1	De 1 a 9.999	De 2 a 1968	15	Escribir de 2 a 1.968 bits de salida en la dirección remota de 0 a 9.998
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 40.001 a 49.999</li> <li>• De 400.001 a 465.535</li> </ul>	De 2 a 123	16	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escribir de 2 a 123 registros de parada en la dirección remota de 0 a 9.998</li> <li>• Escribir de 2 a 123 registros de parada en la dirección remota de 0 a 65.534</li> </ul>

*Nota.* Adaptado de Siemens (2024).

La Tabla 3 muestra los posibles valores de los parámetros de entrada MB\_MODE, MB\_DATA\_ADDR, MB\_DATA\_LEN de la instrucción "MB\_CLIENT" y la función Modbus correspondiente en el entorno de programación TIA Portal de Siemens para configurar y controlar la comunicación Modbus entre un PLC Siemens y otros dispositivos en una red (Siemens, 2024).

**MB\_MODE (Modo MB):** Este parámetro determina el modo en que opera la instrucción "MB\_CLIENT". Permite especificar si la instrucción se emplea para realizar lectura o escritura de los datos en un dispositivo Modbus remoto .

**MB\_DATA\_ADDR (Dirección de datos MB):** Esta variable señala la dirección inicial de los datos que se van a leer o escribir en el dispositivo Modbus remoto. En el caso de la lectura, esta dirección corresponde al primer registro de datos a leer. En la escritura, indica el primer registro donde se escribirán los datos.

**MB\_DATA\_LEN (Longitud de datos MB):** Este valor define la extensión de los datos que se leerán o escribirán en el dispositivo Modbus remoto. Indica el número de registros de datos que se leerán o escribirán desde la dirección especificada en "MB\_DATA\_ADDR".

Todos los archivos correspondientes al proyecto, incluyendo los códigos de programación de ESP32 y PLC se encuentran en el [Repositorio digital del proyecto](#) o en el [sitio web](#) creado por los autores.

**4.3.4.1 ESP32 Cliente y PLC Servidor.** Corresponde al primer caso, para esto. Se configura la ESP32 como Cliente con el código que se encuentra en el [repositorio digital](#). El Cliente debe apuntar a la dirección IP en la cual está configurado el Servidor para enviar las peticiones, en este caso, el servidor PLC S7-1500 con IP 192.168.1.10.

**Figura 26***Código ESP32 como Cliente*

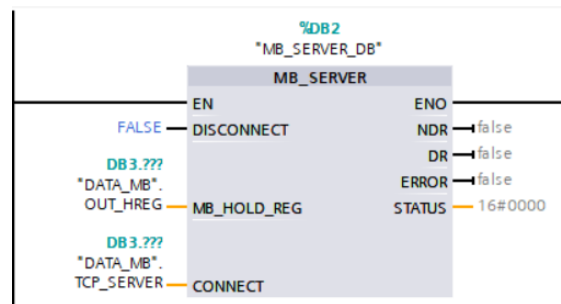
```

ESP32Cliente.ino
1  #ifndef ESP8266
2  #include <ESP8266WiFi.h>
3  #else
4  #include <WiFi.h>
5  #endif
6  #include "ModbusIP_ESP8266.h"
7
8  const int REG0 = 0; //
9  const int REG1 = 1; //
10 const int REG2 = 2; //
11 const int REG3 = 3; //
12
13 IPAddress remote(192, 168, 1, 10);
14 const int LOOP_COUNT = 2;
15
16 ModbusIP mb; //Objeto MODBUS
17
18 void setup() {
19
20   pinMode(2,OUTPUT);
21   pinMode(4,OUTPUT);
22
23   Serial.begin(115200);
24
25   WiFi.begin("PLC_AP"); //Este es el
26
37   mb.client(); //Inicio en modo cliente de ES
38 }
39
40 uint16_t res0 = 0;
41 uint16_t res1 = 0;
42 uint16_t res2 = 0;
43 uint16_t res3 = 0;
44
45 uint8_t show = LOOP_COUNT;
46
47 void loop() {
48   if (mb.isConnected(remote)) { //Chequear
49
50     mb.readIreg(remote, REG0, &res0); //Leer
51     mb.readIreg(remote, REG1, &res1); //Leer
52     mb.readIreg(remote, REG2, &res2); //Leer
53     mb.readIreg(remote, REG3, &res3); //Leer
54
55   } else {
56     mb.connect(remote); //REconecta
57   }
58   mb.task(); // Ejecutar
59   delay(100); // Pulling
60   if (!show--) { // Se mues
61
62     digitalWrite(4,res0);
63     digitalWrite(2,res1);
64     digitalWrite(26,res2);
65     digitalWrite(25,res3);

```

*Nota.* Se puede visualizar las librerías necesarias para la ejecución del código, tales como “WiFi.h” y “ModbusIP\_ESP8266.h”. La instrucción “mb.client()” establece el inicio en modo cliente de la ESP32. Código desarrollado en Arduino (2024) incluyendo la librería ModbusIP de Emelianov (2024).

Ahora, se configura el PLC en modo Servidor. Para esto, se debe añadir el bloque de sistema correspondiente a MB\_SERVER en un segmento del bloque de organización principal (OB\_Main). Se pueden encontrar más detalles sobre la configuración y parámetros ajustados en el Apéndice B: Modbus/TCP con instrucciones "MB\_CLIENT" y "MB\_SERVER" (Siemens, 2024).

**Figura 27***Bloque de Sistema MB\_SERVER*

*Nota.* Se pueden visualizar los diferentes parámetros ajustados al bloque de sistema MB\_SERVER. Visualización del bloque en TIA Portal (Siemens, 2024).

Según lo estipulado por Siemens (2024) en su [Manual del Sistema](#), el parámetro MB\_HOLD\_REG corresponde a un puntero de tipo Word creado en un bloque de datos. Adicionalmente, el parámetro CONNECT debe apuntar a un vector de tipo TCON\_IP\_V4 creado en un bloque de datos, que incluye los parámetros requeridos para iniciar la conexión (Siemens, 2024). Para crear el bloque de datos. Se debe seleccionar la opción Agregar un nuevo bloque, en la interfaz de TIA Portal.

**Figura 28***Bloque de Datos DATA\_MB*

DATA_MB				
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...
1	Static			
2	OUT_HREG	Array[0..3] o...	...	
3	OUT_HREG[0]	Word	...	16#0
4	OUT_HREG[1]	Word	...	16#0
5	OUT_HREG[2]	Word	...	16#0
6	OUT_HREG[3]	Word	...	16#0
7	TCP_SERVER	TCON_IP_v4	...	
8	Interfaceld	HW_ANY	...	64
9	ID	CONN_OUC	...	16#1
10	ConnectionType	Byte	...	16#0B
11	ActiveEstablished	Bool	...	false
12	RemoteAddress	IP_V4	...	
13	ADDR	Array[1..4] of Byte	...	
14	ADDR[1]	Byte	...	16#0
15	ADDR[2]	Byte	...	16#0
16	ADDR[3]	Byte	...	16#0
17	ADDR[4]	Byte	...	16#0
18	RemotePort	UInt	...	0
19	LocalPort	UInt	...	502

*Nota.* Se pueden visualizar los diferentes parámetros ajustados al bloque de datos. Visualización del bloque en TIA Portal (Siemens, 2024).

Se puede conseguir más información para el ajuste de parámetros y creación de bloques en el [Manual de Sistema](#) de STEP 7 y WinCC Engineering.

**4.3.4.2 PLC Cliente y ESP32 Servidor.** Corresponde al segundo caso, para esto. Se configura el PLC como Cliente con el código de TIA Portal que se encuentra en el [repositorio digital](#). El Cliente debe apuntar a la dirección IP en la cual está configurado el Servidor para enviar las peticiones, en este caso, el módulo ESP32 con IP 192.168.1.101.

Figura 29

*Código ESP32 como Servidor*

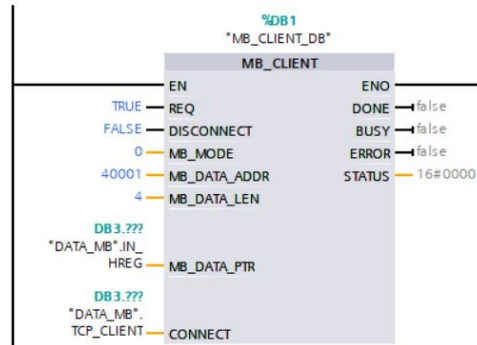
```

19 void setup() {
20     pinMode(18, INPUT);
21     pinMode(19, INPUT);
22
23     Serial.begin(115200);
24     //Conectar con SSID de red local
25     WiFi.begin("PLC_AP");
26     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
27         delay(500);
28         Serial.print(".");
29     }
30
31     Serial.println("");
32     Serial.println("WiFi connected");
33     Serial.println("IP address: ");
34     Serial.println(WiFi.localIP()); //Mostra
35
36     mb.server(); //ESP32 en modo servidor
37
38     mb.addHreg(HREG0); //Crear Holding regist
39     mb.addHreg(HREG1);
40     mb.addHreg(HREG2);
41     mb.addHreg(HREG3);
42
43
44
45
46
47
48 void loop() {
49     //Llamar a librerías y funciones
50     mb.task();
51
52     //Leer temperatura e incrementar
53     if (millis() > ts + 500) {
54         ts = millis();
55
56         int DIG0 = digitalRead(18); //
57         int DIG1 = digitalRead(19); //
58         int ANG0 = analogRead(35); //
59         int ANG1 = analogRead(34); //
60
61         mb.Hreg(HREG0, DIG0); //Escri
62         mb.Hreg(HREG1, DIG1);
63         mb.Hreg(HREG2, ANG0); //Escri
64         mb.Hreg(HREG3, ANG1);
65     }
66     delay(10);
67 }
68

```

*Nota.* Se puede visualizar las librerías necesarias para la ejecución del código, tales como “WiFi.h” y “ModbusIP\_ESP8266.h”. La instrucción “mb.server()” establece el inicio en modo servidor de la ESP32. Código desarrollado en Arduino (2024) incluyendo la librería ModbusIP de Emelianov (2024).

Ahora, se configura el PLC en modo Cliente. Para esto, se debe añadir al bloque de organización principal (OB\_Main) el bloque correspondiente a MB\_CLIENT. Se pueden encontrar más detalles sobre la configuración y parámetros ajustados en el Manual de Sistemas de los bloques.

**Figura 30***Bloque MB\_Client TIA Portal*

*Nota.* Se pueden visualizar los diferentes parámetros ajustados al bloque de sistema MB\_Client. Visualización del bloque en TIA Portal (Siemens, 2024).

MB\_DATA\_PTR es un parámetro que corresponde a un puntero de tipo Word creado en un bloque de datos. Adicionalmente, el parámetro CONNECT debe apuntar a un vector de tipo TCON\_IP\_V4 creado en un bloque de datos, que incluye la información de los parámetros necesarios para establecer la conexión. El ajuste predeterminado de los parámetros MB\_MODE, MB\_DATA\_ADDR y MB\_DATA\_LEN define el código de función Modbus que se emplea para enviar el mensaje hacia el servidor. El parámetro MB\_DATA\_ADDR contiene la información correspondiente a lectura y escritura. El parámetro DATA\_LEN contiene el número de valores que se van a leer o escribir (Siemens, 2024)

Para crear el bloque de datos. Se debe seleccionar la opción Agregar un nuevo bloque, en la interfaz de TIA Portal.

**Figura 31***Bloque de datos DATA\_MB*

DATA_MB			
Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...
Static			
TCP_CLIENT	TCON_IP_v4	...	
Interfaced	HW_ANY	...	64
ID	CONN_OUC	...	16#1
ConnectionType	Byte	...	16#0B
ActiveEstablished	Bool	...	1
RemoteAddress	IP_V4	...	
ADDR	Array[1..4] of Byte	...	
ADDR[1]	Byte	...	192
ADDR[2]	Byte	...	168
ADDR[3]	Byte	...	1
ADDR[4]	Byte	...	101
RemotePort	Uint	...	502
LocalPort	Uint	...	0
IN_HREG	Array[0..3] of Word	...	
IN_HREG[0]	Word	...	16#0
IN_HREG[1]	Word	...	16#0
IN_HREG[2]	Word	...	16#0
IN_HREG[3]	Word	...	16#0

*Nota.* Se pueden visualizar los diferentes parámetros ajustados al bloque de datos. Visualización del bloque en TIA Portal (Siemens, 2024).

Se puede conseguir más información para el ajuste de parámetros y creación de bloques en el [Manual de Sistema](#) de STEP 7 y WinCC Engineering (Siemens, 2024).

#### 4.3.5 Validación de funcionamiento

La validación de funcionamiento es la etapa culminante del proyecto, aquí se verifica el correcto funcionamiento del componente en condiciones reales de operación. Las pruebas se centran en verificar que la tarjeta electrónica diseñada, junto con el PLC y otros dispositivos, cumplan con los requisitos y especificaciones establecidos durante las etapas de diseño y desarrollo.

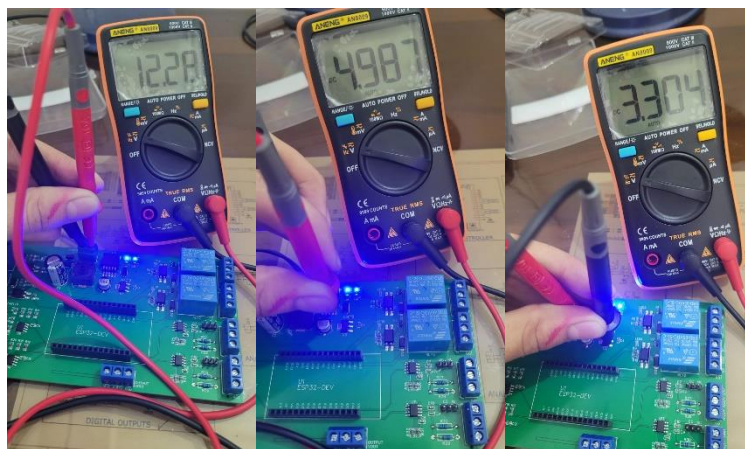
Durante la validación, se llevan a cabo pruebas exhaustivas para verificar la funcionalidad de todos los componentes electrónicos y subsistemas. Se evalúa la capacidad del sistema para

procesar y responder adecuadamente a las señales de entrada, así como su capacidad para controlar y monitorear dispositivos externos según lo previsto.

Primeramente, se debe validar el correcto funcionamiento del circuito de alimentación de la tarjeta electrónica, es decir, que elementalmente la tarjeta electrónica encienda. Se aplicó tensión de entrada de 12 [V] y se verificó que los reguladores de voltaje proporcionaran las salidas esperadas: 5 [V] y 3.3 [V]. Esta prueba se verificó con un medidor de voltaje.

### Figura 32

#### *Validación circuito de alimentación*



*Nota.* Se puede evidenciar el correcto funcionamiento del circuito de encendido, con los valores de tensión de alimentación de la tarjeta electrónica y los valores de tensión esperados a las salidas de los reguladores, los indicadores luminosos LED de color azul, dan señal del correcto funcionamiento de los reguladores respectivamente.

Posteriormente, se verifica la compatibilidad y la comunicación efectiva entre todos los elementos del sistema, incluyendo el PLC, la tarjeta electrónica y otros dispositivos periféricos. Se

garantiza que la información se transmita de manera confiable y que las órdenes de control se ejecuten correctamente.

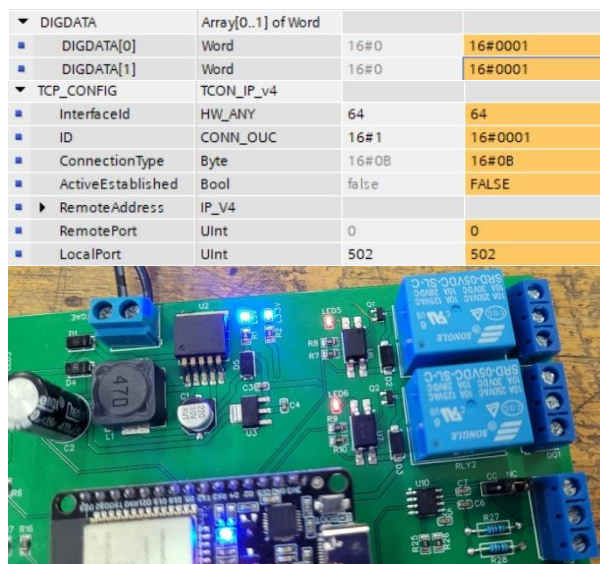
Para esto, una vez realizadas las conexiones de red local y todos los dispositivos son acordes a la topología indicada en la Metodología, mediante el software TIA Portal, se utiliza la opción “Establecer conexión online” y luego, “Activar Observación” para el Bloque de Datos correspondiente a cada caso de Cliente y Servidor (Siemens, 2024).

Para el caso de salidas digitales y analógicas, el PLC se configura en modo Servidor, pues según las peticiones de lectura realizadas por la ESP32 en su rol de Cliente, el PLC enviará las señales que se pretendan implementar en la tarjeta electrónica.

La verificación de las salidas digitales se llevó a cabo mediante la activación de dispositivos de prueba, como luces LED o relés.

### Figura 33

#### *Validación salidas digitales*



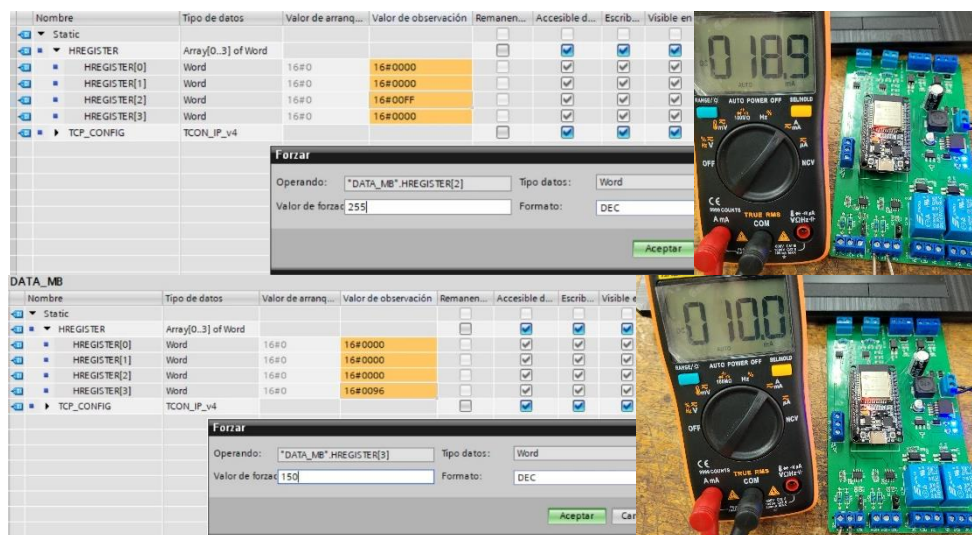
*Nota.* Se puede evidenciar que al forzar el valor del vector tipo Word en posiciones 0 y 1, que corresponden a salidas digitales de la tarjeta electrónica, con ESP32 en modo Cliente, el PLC obedece la instrucción de lectura enviando el dato deseado a implementar, la ESP32 realiza una instrucción digital en sus pines que se traducen en la activación del relé y su indicador luminoso LED de color rojo.

Esta prueba confirma la capacidad de la tarjeta electrónica para controlar la activación de dispositivos digitales externos.

Para los registros de salida con valores analógicos, se realizaron pruebas utilizando un dispositivo de medición de corriente. Se aplicaron señales forzadas desde el PLC a las salidas analógicas correspondientes, y se midieron los niveles de corriente generados por cada salida.

### Figura 34

#### *Validación salidas analógicas*



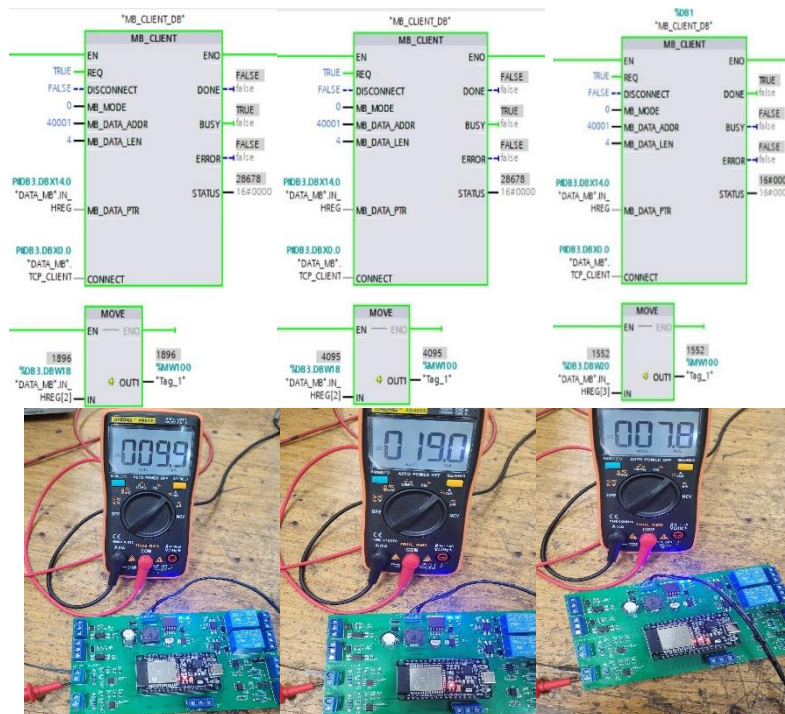
*Nota.* Se puede evidenciar que al forzar el valor del vector tipo Word en posiciones 2 y 3, que corresponden a salidas analógicas de la tarjeta electrónica, con ESP32 en modo Cliente, el PLC

obedece la instrucción de lectura enviando el dato deseado a implementar, la ESP32 realiza una instrucción analógica en sus pines que se traducen el valor analógico que se visualiza en el amperímetro, los valores corresponden para un DAC de 8 bits.

Estas pruebas demostraron que las salidas analógicas tienen la capacidad de proporcionar señales adecuadas para el control de dispositivos externos. El prototipo diseñado cumple con las pruebas de validación presentadas para la salida de señales análogas y digitales. Para el caso de Entradas Digitales y Analógicas, la ESP32 se configura en modo Servidor, pues según las peticiones de lectura realizadas por el PLC en su rol de Cliente, la ESP32 enviará las señales que ingresan a la tarjeta electrónica.

**Figura 35**

*Validación entradas analógicas*

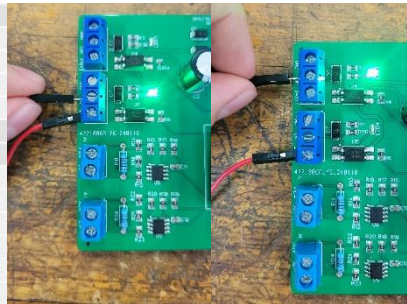


*Nota.* Se pueden visualizar el ingreso de señales de corriente de 9,9 mA y otra de 19 mA para la IN0; y una señal de 7,8 mA para IN1, a su vez, el monitoreo mediante la opción activar observación, los valores corresponden para un ADC de 12 bits.

**Figura 36**

*Validación entradas digitales*

▼ TCP_CLIENT	TCON_IP_v4	22.0		
■ Interfaceld	HW_ANY	22.0	64	
■ ID	CONN_OUC	24.0	16#1	
■ ConnectionType	Byte	26.0	16#0B	
■ ActiveEstablished	Bool	27.0	1	
■ ▼ RemoteAddress	IP_V4	28.0		
■ ▼ ADDR	Array[1..4] of Byte	28.0		
■ ADDR[1]	Byte	28.0	192	
■ ADDR[2]	Byte	29.0	168	
■ ADDR[3]	Byte	30.0	1	
■ ADDR[4]	Byte	31.0	101	
■ RemotePort	UInt	32.0	502	
■ LocalPort	UInt	34.0	0	
■ ▼ IN_HREG	Array[0..3] of Word	36.0		
■ IN_HREG[0]	Word	36.0	16#0	16#0001
■ IN_HREG[1]	Word	38.0	16#0	16#0000
■ ▼ IN_HREG	Array[0..3] of Word	36.0		
■ IN_HREG[0]	Word	36.0	16#0	16#0000
■ IN_HREG[1]	Word	38.0	16#0	16#0001



*Nota.* Se pueden visualizar el ingreso de señales de activación digital de 12V para IN0; y para IN1, a su vez, el monitoreo mediante la opción activar observación, el indicador luminoso LED de color verde indica entrada digital activa.

El prototipo diseñado cumple con las pruebas de validación presentadas para la salida de señales análogas y digitales.

Una vez completadas satisfactoriamente todas las pruebas de validación, el sistema está listo para ser implementado en el entorno operativo previsto, Concluyendo con el éxito del proyecto y principalmente, contribuyendo así a mejorar la eficiencia y la productividad en el contexto de la automatización industrial.

#### 4.4 Características del componente

La tarjeta electrónica diseñada presenta una serie de características eléctricas fundamentales que garantizan su funcionalidad.

**Tabla 4**

*Características eléctricas*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Max/Min/Typ</b>
Voltaje de alimentación	12 - 24 [ $V_{DC}$ ]	Min - Max
Corriente de alimentación	1 [A]	Min
Potencia consumida	10 [W]	Typ
Entradas digitales	2	
Rango de tensión	12 - 24 [ $V_{DC}$ ]	Min - Max
$V_{IH}$	10 [ $V_{DC}$ ]	Min
$V_{LH}$	1 [ $V_{DC}$ ]	Max
$R_{in}$	1000 [ $\Omega$ ]	Typ
Entradas analógicas	2	Max
Corriente	0 – 20 m[A]	Max
Tensión	0 - 2 [ $V_{DC}$ ]	Max
$R_{in}$	100 [ $\Omega$ ]	Typ
Salidas digitales (Relé)	2	
DC	28 [ $V_{DC}$ ] / 10 [A]	Max
AC	250 [ $V_{AC}$ ] / 10 [A]	Max
Salidas analógicas	2	
Corriente	0 – 20 m[A]	Max
Tensión	0 – 10 [ $V_{DC}$ ]	Max
$R_{load}$	500 [ $\Omega$ ]	-
Conectividad	Wi-Fi 802.11b/g/n/e/i @ 2.4 GHz	-

#### 4.5 Presupuestos

El desarrollo e implementación de la tarjeta electrónica implicó una inversión significativa en materiales, componentes y recursos técnicos. En la Tabla 5 se describen los costos totales del proyecto

**Tabla 5**

*Costo total de la tarjeta electrónica*

Descripción	Cantidad	Subtotal [\$]
Tarjeta Electrónica y Componentes	5 (2)*	279 000
Envío Internacional	1	190 000
Router y Cables RJ-45	1	75 000
IVA 19%	1	68 000
Aduana Manejos Especiales	1	53 000
ESP32 DOIT	2	40 000
Adaptador AC/DC 12V 1.5A	2	40 000
<b>Total</b>	<b>**</b>	<b>745 000</b>

*Nota.* \*5 PCB, 2 de ellas ensambladas y con soldadura de componentes, incluye el precio de adquisición de los componentes seleccionados. \*\*El total corresponde al precio de implementación de 2 módulos de expansión de entradas.

Si bien la tarjeta electrónica desarrollada presenta una propuesta innovadora que busca optimizar los procesos industriales. Es crucial no solo evaluar la funcionalidad y calidad del producto, sino también su viabilidad económica en comparación con otros módulos disponibles en el mercado. Por lo cual es necesario explorar el panorama de precios de la tarjeta electrónica diseñada en comparación con otros módulos existentes en el mercado.

**Figura 37***Módulo de salidas digitales*


S7-1500 Siemens SKU 6ES75225FF000AB0

**6ES7522-5FF00-0AB0 SIEMENS**

**6 EN ESTOCK** Entrega urgente

Nuevo - 12 Meses de Garantía

**964.393,00 COP**

**Descripción:**  
SIMATIC S7-1500, módulo de salidas digitales DQ 8 x 230 V AC/2 A ST; TRIAC; 8 canales en grupos de 1; 2 A por grupo; valor sustitutivo: el conector frontal (bornes de tornillo o inserción rápida) debe pedirse por separado

*Nota.* Tomado de WiAutomation (2024).

**Figura 38***Módulo entradas digitales*


S7-1500 Siemens SKU 6AG15211BH507AA0

**6AG1521-1BH50-7AA0 SIEMENS**

**DISPONIBLE BAJO PEDIDO**

Nuevo - 12 Meses de Garantía

**662.148,13 COP**

**Descripción:**  
SIPLUS S7-1500 DI 16X24VDC SRC -40 ... +70 GRADO C CON RECUBRIMIENTO CONFORMAL BASADO EN 6ES7521-1BH50-0AA0. MÓDULO DE ENTRADA DIGITAL DI16 X DC24V, FUENTE 16 CANALES EN GRUPOS DE 16 RETARDO DE ENTRADA 3.2MS ENTRADA TIPO 3 (IEC 61131)

*Nota.* Tomado de WiAutomation (2024).

**Figura 39***Módulo salidas analógicas*


S7-1500 Siemens SKU 6ES75325HD000AB0

**6ES7532-5HD00-0AB0 SIEMENS**

**EN ESTOCK** Entrega urgente

Nuevo - 12 Meses de Garantía

**1.969.824,00 COP**

**Descripción:**  
SIMATIC S7-1500, Módulo de salidas analógicas AQ 4xU/I ST, resolución de 16 bits, Precisión 0.3 RATE. 4 canales en grupos de 4, diagnóstico, valor sustitutivo incl. elemento de alimentación, soporte de pantalla y terminal de pantalla: Conector frontal (bornes de tornillo o push-in) por separado

*Nota.* Tomado de WiAutomation (2024).**Figura 40***Módulo entradas analógicas*


S7-1500 Siemens SKU 6ES75317KF000AB0

**6ES7531-7KF00-0AB0 SIEMENS**

**EN ESTOCK** Entrega urgente

Nuevo - 12 Meses de Garantía

**2.031.381,00 COP**

**Descripción:**  
SIMATIC S7-1500, módulo de entradas analógicas AI 8 x U//RTD/TC ST, Resolución de 16 bits, precisión 0,3 %, 8 canales en grupos de 8, 4 canales para medición de RTD, tensión en modo común 10 V; diagnóstico; alarmas de proceso incl. elemento de alimentación, abrazadera de pantalla y clip de pantalla: el conector frontal (bornes de tornillo o inserción rápida) debe pedirse por separado

*Nota.* Tomado de WiAutomation (2024).

Realizando un análisis económico en comparación con módulos de tipo comercial, la tarjeta electrónica diseñada representa una alternativa viable en funcionamiento y valor comercial frente a otros productos con características similares. Pues el precio de implementación de dos tarjetas electrónicas incluyendo los dispositivos adicionales necesarios para su conectividad, corresponden a un valor de \$ 745,000 pesos colombianos, tal y como se evidencia en la Tabla 5.

La tarjeta incluye entradas y salidas de tipo analógico y digital, mientras que comercialmente para tener todas estas características se deben adquirir hasta 4 módulos diferentes, llegando a valor comercial cercano a los \$ 5,500,000 de pesos colombianos, lo cual representa un valor de inversión de hasta 7 veces más en comparación con el dispositivo propuesto en esta investigación.

## **5. Conclusiones**

La creación de una tarjeta electrónica capaz de expandir las capacidades operativas de un PLC representa un avance significativo en el ámbito de la automatización industrial. Este proyecto abre nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y la flexibilidad de los sistemas de control en diversos sectores industriales.

La investigación realizada en el marco de este proyecto contribuye a la generación de conocimiento en el campo de la automatización industrial y la electrónica. Los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas sirven como base para futuros proyectos y avances tecnológicos en áreas relacionadas, estimulando así la innovación y el progreso en la sociedad.

El prototipo desarrollado satisface las necesidades planteadas en cuanto a criterios económicos, de diseño, de disponibilidad y compatibilidad. Esto se logra mediante programas desarrollados en TIA Portal y el IDE Arduino, con los cuales se incorpora el protocolo de comunicación Modbus.

Se evidencia que el prototipo implementado permite ampliar la capacidad de operación de un PLC, posibilitando el acceso a la automatización y/o mejorar los procesos ya aplicados en las industrias. Esto se logra mediante el uso del microcontrolador ESP-32, el cual puede asumir roles de cliente o servidor según la especificación del proceso industrial.

El protocolo de comunicación Modbus TCP/IP resulta ser el adecuado para aplicaciones pequeñas y medianas de procesos industriales, ya que el costo de mantenimiento de la infraestructura de la red es bastante bajo y, en caso de incorporar más equipos, no se está sujeto a una marca o proveedor específico.

## **6. Recomendaciones**

Como recomendaciones y posibles mejoras del prototipo, se podrían plantear diferentes alternativas.

Por ejemplo, la implementación de un protocolo de comunicación de tipo Full-Dúplex como PROFINET, el cual permita una comunicación bidireccional y simultánea entre los dispositivos.

Aumentar la cantidad de entradas y salidas de tipo digital, incluyendo entradas de voltaje en corriente alterna.

La implementación de un medio físico cableado para la comunicación de la tarjeta electrónica con el PLC eliminaría la necesidad de un Router para conectividad inalámbrica.

En términos de tamaño físico de la tarjeta electrónica, podría plantearse la implementación de alternativas de microcontrolador, como el chip ESP32-WROOM-32D, con el fin de reducir el tamaño de la PCB.

**Referencias bibliográficas**

Acosta, J. (5 de Noviembre de 2023). *La resistencia a la reindustrialización para el desarrollo.*

Razón Pública: <https://razonpublica.com/la-resistencia-la-reindustrializacion-desarrollo/>

Arduino. (2024). *Software / Arduino.* <https://www.arduino.cc/en/software>

Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers* (Sixth Edition ed.). Oxford: Elsevier.

[https://www.academia.edu/94987128/William\\_Bolton\\_Programmable\\_Logic\\_Controllers\\_Sixth\\_Edition\\_Newnes\\_2015\\_](https://www.academia.edu/94987128/William_Bolton_Programmable_Logic_Controllers_Sixth_Edition_Newnes_2015_)

Borja Calvo, L. (2019). *Adquisición de datos desde plataforma IOT2040. Protocolos Modbus/TCP*

y OPC UA. Universidad del País Vasco: Tesis de grado.

[https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/36491/TFG-](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/36491/TFG-%20Borja%20Calvo.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

[%20Borja%20Calvo.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/36491/TFG-%20Borja%20Calvo.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Cajamarca, I. (13 de Noviembre de 2021). *Industrias estarán frenadas hasta 2023 ante la crisis*

*generada por la escasez de chips.* Diario la República:

<https://www.larepublica.co/internet-economy/industrias-estaran-frenadas-hasta-2023->

[ante-la-crisis-generada-por-la-escasez-de-chips-3261411](https://www.larepublica.co/internet-economy/industrias-estaran-frenadas-hasta-2023-ante-la-crisis-generada-por-la-escasez-de-chips-3261411)

DigiKey. (2024). *Conversión de ancho de traza de PCB.* DigiKey:

[https://www.digikey.com/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-](https://www.digikey.com/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width)

[trace-width](https://www.digikey.com/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width)

EasyEDA. (2024). *Simulador de circuitos y diseño de circuitos impresos online.*

<https://easyeda.com/es>

Electrónico, T. (15 de Marzo de 2022). *Comunicación MODBUS TCP (Servidor-Cliente) entre*

*PLC Siemens S7-1200 y ESP32.* YouTube: <https://youtu.be/CzEdDJVsmAM>

- Emelianov. (2024). *Most complete Modbus library for Arduino*. GitHub:  
<https://github.com/emelianov/modbus-esp8266>
- Espressif Systems. (2024). *ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SOC*.  
<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- IPSON.nl. (s.f.). *Opamp basics - Technology for Art and Education*. <https://www.ipson.nl/opamp-circuit-examples/>
- JLCPCB. (2024). *PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB*.  
<https://jlcpcb.com/>
- Joan. (2024). *Tutorial del optoacoplador con circuito de E/S*. Electrónica Joan:  
<https://electrojoan.com/tutorial-del-optoacoplador-con-circuito-de-e-s/>
- Labcenter Electronics. (2024). *PCB Design and Circuit Simulator Software - Proteus*.  
<https://www.labcenter.com/>
- Last Minute Engineers. (2024). *ESP32 Pinout reference*. Last Minute Engineers:  
<https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>
- Lesmes, L. (31 de Enero de 2022). *El impacto de la crisis de contenedores podría ir hasta 2023*.  
Revista Portafolio: <https://www.portafolio.co/revista-portafolio/el-impacto-de-la-crisis-de-contenedores-podria-ir-hasta-2023-561156>
- Mandado, E., Acevedo, J. M., Fernandez, C., y Armesto, J. (2009). *Autómatas programables y sistemas de automatización*. MARCOMBO, S.A.  
[https://www.academia.edu/43582464/Automatas\\_Programables\\_y\\_Sistemas\\_de\\_Automatizacion\\_Parte](https://www.academia.edu/43582464/Automatas_Programables_y_Sistemas_de_Automatizacion_Parte)
- MERCUSYS Technologies Co. (2024). *Welcome to MERCUSYS*. <https://www.mercusys.com/co/>

- Mordor Intelligence. (2024). *Mercado PLC*. Mordor Intelligence: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/programmable-logic-controller-plc-market>
- Ruiz Olaya, A. F., Barandica López, A., y Guerrero Moreno, F. G. (2024). Implementación de una Red MODBUS/TCP. *Ingeniería y Competitividad*, 35-44.
- Sanchis, R., Romero, J., y Ariño, C. (2010). *Automatización Industrial*. España: Publicaciones de la Universitat Jaume I.
- Schneider Electric. (2020). *Funciones TCP/IP Modbus*. Schneider Electric: [https://product-help.schneider-electric.com/ED/PowerTag/Smartlink\\_SIB/EDMS/DOCA0123ES/DOCA0123xx/Details\\_of\\_Modbus\\_Functions/Details\\_of\\_Modbus\\_Functions-2.htm#XREF\\_D\\_SE\\_0060560\\_1](https://product-help.schneider-electric.com/ED/PowerTag/Smartlink_SIB/EDMS/DOCA0123ES/DOCA0123xx/Details_of_Modbus_Functions/Details_of_Modbus_Functions-2.htm#XREF_D_SE_0060560_1)
- Siemens. (2024). *TIA Portal - Siemens Global*. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- WiAutomation. (2024). *WiAutomation | Proveedor de repuestos de automatización*. <https://co.wiautomation.com/>