



---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR  
DE ATLIXCO**

*Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Puebla*

**NOMBRE DEL TRABAJO**

**DISEÑO DE UN PLC BASADO EN UN  
MICROCONTROLADOR ARM CORTEX-M4 PARA SU  
APLICACIÓN ES UNA MÁQUINA DESTERRONADORA-  
CERNIDORA**

**OPCIÓN**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Mecatrónico**

PRESENTA:

**José Enrique Fierro Lora**

**ASESOR: Dra. Mariana Natalia Ibarra Bonilla**

ATLIXCO, PUE. SEPTIEMBRE DE 2022

# ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>2</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Hipótesis .....	2
1.3. Objetivo General .....	2
1.4. Objetivos específicos .....	3
1.5. Justificación.....	3
1.6. Alcance del proyecto .....	3
1.7. Delimitación del proyecto .....	4
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1. Marco Histórico .....	5
2.2. Estructura teórica que sustenta el estudio .....	10
2.2.1. Controlador Lógico Programable (PLC) .....	10
2.2.2. Microcontroladores.....	22
2.2.3. Microcontroladores basados en ARM.....	28
2.2.4. Plataforma Ophyra .....	35
<b>Capítulo III. DISEÑO Y DESARROLLO DEL pLC</b> .....	<b>37</b>
3.1. Proyectos de referencia.....	37
3.1.1. PLC didáctico.....	37
3.1.2. PLC IoT.....	39

3.1.3. Análisis .....	40
3.2. Especificaciones del PLC .....	42
3.2.1. Requerimientos generales .....	42
3.2.2. Especificaciones electrónicas .....	44
3.3.3. Funcionamiento .....	45
3.4. Desarrollo de hardware para el PLC.....	48
3.4.1. Características de los componentes .....	48
3.4.2. Alimentación del PLC.....	54
3.4.3. Entradas del PLC.....	56
3.4.4. Salidas del PLC .....	57
3.4.5. Puerto de programación del PLC. ....	58
3.4.6. Cristal externo y alimentación del microcontrolador .....	60
3.4.7. Pulsadores de propósito específico.....	61
3.4.8. Diseño de la PCB.....	62
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
4.1. Diseño final de la PCB .....	70
4.1.1. Análisis comparativo .....	74
4.1.2. Resumen de resultados .....	79
4.2. Costos de fabricación.....	79

<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>84</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>86</b>
Anexo 1. Diagramas esquemáticos.....	86
Anexo 2. Cotización de componentes electrónicos. ....	89
Anexo 3. Cotización de fabricación y ensamble. ....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> PLC MODICON 084. ....	6
<b>Figura 2.</b> Modicon 184, segundo controlador programable de Modicon en 1973. ....	7
<b>Figura 3.</b> Línea del tiempo de Modicon y Allen-Bradley (1968-1995). ....	9
<b>Figura 4.</b> Controlador Lógico Programable (PLC). ....	10
<b>Figura 5.</b> a) PLC de tipo modular, b) Estructura de un PLC modular. ....	12
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática a bloques de la estructura de un PLC. ....	13
<b>Figura 7.</b> Arquitectura típica de un PLC. ....	14
<b>Figura 8.</b> Representación de escaneo de un PLC. ....	16
<b>Figura 9.</b> Sección de CPU de un PLC. ....	17
<b>Figura 10.</b> Buses de un PLC. ....	18
<b>Figura 11.</b> Tarjeta de memoria típica de un PLC. ....	19
<b>Figura 12.</b> Diagrama de la interfaz de entrada optoacoplada de un PLC. ....	20
<b>Figura 13.</b> Diagrama de la interfaz de salida optoacoplada de un PLC a) de tipo relé b) de tipo transistor. ....	21
<b>Figura 14.</b> Aplicación típica de un microcontrolador. ....	23
<b>Figura 15.</b> Clasificación de los tipos de microcontroladores. ....	24
<b>Figura 16.</b> Partes generales que conforman a un microcontrolador. ....	25
<b>Figura 17.</b> Estructura interna de un microcontrolador. ....	26
<b>Figura 18.</b> Arquitectura Von Neumann. ....	27
<b>Figura 19.</b> Arquitectura Harvard. ....	27
<b>Figura 20.</b> Evolución de la arquitectura ARM. ....	28
<b>Figura 21.</b> Diagrama de bloques de la estructura para un MCU ARM Cortex M-4. ....	31
<b>Figura 22.</b> Diagrama de bloques de la arquitectura de un MCU Cortex-M4. ....	32
<b>Figura 23.</b> Campos de aplicación de los microcontroladores ARM. ....	34
<b>Figura 24.</b> Diagrama de bloques del sistema Ophyra. ....	36
<b>Figura 25.</b> PCB del controlador programable didáctico. ....	38
<b>Figura 26.</b> Diseño de PCB del PLC IoT. ....	40
<b>Figura 27.</b> Diagrama a bloques del hardware del PLC. ....	46
<b>Figura 28.</b> Diagrama de conexiones del PLC. ....	47
<b>Figura 29.</b> Diagrama esquemático de la fuente de alimentación. ....	55
<b>Figura 30.</b> Diagrama esquemático del circuito de entrada. ....	56
<b>Figura 31.</b> Diagrama esquemático del circuito de salida. ....	58

<b>Figura 32.</b>	Diagrama del módulo de potencia del puerto USB. ....	58
<b>Figura 33.</b>	Diagrama esquemático del puerto de programación USB. ....	59
<b>Figura 34.</b>	Diagrama esquemático del cristal externo. ....	60
<b>Figura 35.</b>	Diagrama esquemático de la alimentación del microcontrolador. ....	61
<b>Figura 36.</b>	Diagrama esquemático de los pulsadores de propósito específico. ....	62
<b>Figura 37.</b>	Distribución de los componentes del PCB. ....	64
<b>Figura 38.</b>	Distribución de componentes y visualización de capas mecánicas. ....	65
<b>Figura 39.</b>	Ruteo de pistas de la capa superior e inferior del PCB. ....	67
<b>Figura 40.</b>	Polígonos de voltaje ubicados en la capa superior del PCB. ....	68
<b>Figura 41.</b>	Polígonos de GND ubicados en la capa inferior del PCB. ....	69
<b>Figura 42.</b>	Vista superior de la placa PCB del Controlador Lógico Programable. ....	70
<b>Figura 43.</b>	Vista inferior de la placa PCB del Controlador Lógico Programable. ....	71
<b>Figura 44.</b>	Vista del diseño final de la PCB del Controlador Lógico Programable. ....	72
<b>Figura 45.</b>	Vista isométrica de la PCB en Fusión 360 del Controlador Lógico Programable. ...	73
<b>Figura 46.</b>	Conexiones de la placa PCB del Controlador Lógico Programable. ....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Descripción de la serie Cortex-M. ....	29
<b>Tabla 2.</b> Comparación de las diferentes características de proyectos de referencia. ....	41
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones generales del PLC. ....	44
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones electrónicas del PLC. ....	45
<b>Tabla 5.</b> Características del microcontrolador. ....	48
<b>Tabla 6.</b> Características del Optoacoplador. ....	49
<b>Tabla 7.</b> Características del transistor. ....	49
<b>Tabla 8.</b> Características eléctricas del relevador. ....	50
<b>Tabla 9.</b> Características eléctricas del módulo de fuente de alimentación. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Características eléctricas del regulador reductor de voltaje. ....	51
<b>Tabla 11.</b> Características generales y eléctricas de los Leds. ....	52
<b>Tabla 12.</b> Características de las terminales de conexión. ....	52
<b>Tabla 13.</b> Características eléctricas de las resistencias. ....	53
<b>Tabla 14.</b> Características eléctricas de los capacitores cerámicos. ....	53
<b>Tabla 15.</b> Características eléctricas del diodo (módulo de salidas). ....	54
<b>Tabla 16.</b> Descripción de los pines del puerto de programación USB. ....	59
<b>Tabla 17.</b> Características de los pulsadores de propósito específico. ....	61
<b>Tabla 18.</b> Tabla de componentes utilizados en el diseño del PCB. ....	63
<b>Tabla 19.</b> Reglas de diseño para PCB. ....	66
<b>Tabla 20.</b> Características de la placa PCB. ....	73
<b>Tabla 21.</b> Comparación de especificaciones de PLC´s. ....	75
<b>Tabla 22.</b> Tabla de comparación de PLC´s comerciales vs Micro PLC Board v1.0. ....	77
<b>Tabla 23.</b> Lista de cotejo para la evaluación del diseño del PLC. ....	78
<b>Tabla 24.</b> Especificaciones generales del motor de la máquina desterradora-cernidora de arcilla. ....	79
<b>Tabla 25.</b> Costo unitario y total de los componentes de la palca PCB. ....	80
<b>Tabla 26.</b> Costo de implementación del PLC. ....	81

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo el diseño de un Controlador Lógico Programable, basado en un microcontrolador ARM Cortex-M4® como unidad principal de procesamiento. Este hardware está dedicado a la automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla, el cual reúne los elementos necesarios de un PLC, logrando realizar operaciones y funciones lógicas.

Para el desarrollo del PCB se utilizó el software de Altium Designer® debido a su innovación en sus herramientas de diseño y su entorno unificado, siendo un programa eficiente, logrando productos de alta calidad y con mayor rapidez. La placa PCB cuenta con 14 entradas y 8 salidas digitales optoacopladas, las salidas son de tipo relé; cuenta con un puerto de expansión destinado a una segunda tarjeta PCB, teniendo como finalidad la implementación de entradas analógicas. La alimentación es de 100-240AC, para obtener este rango de voltaje se utilizaron 2 fuentes conmutadas, cada una con voltaje de salida de 12 VDC, cada fuente tiene capacidad de potencia de 20W. Tiene una salida de comunicación serial (RX y TX) y para su programación se incorporó un puerto micro USB tipo B.



## ABSTRACT

This thesis work aims to design a Programmable Logic Controller, based on an ARM Cortex-M4® microcontroller as the main processing unit. This hardware is dedicated to the automation of a clay lump-sifter machine, which gathers the necessary elements of a PLC, managing to carry out logical operations and functions.

For the development of the PCB, the Altium Designer® software was used due to its innovation in its design tools and its unified environment, being an efficient program, achieving high quality products and faster. The PCB board has 14 optocoupled digital inputs and 8 outputs, the outputs are relay type; It has an expansion port for a second PCB card, with the purpose of implementing analog inputs. The power supply is 100-240AC, to obtain this voltage range, 2 switched sources were used, each with an output voltage of 12 VDC, each source has a power capacity of 20W. It has a serial communication output (RX and TX) and a type B micro USB port was incorporated for its programming.

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería de la automatización y control se ha desarrollado de manera significativa con el paso del tiempo. Hace algunos años, las máquinas tenían mecanismos y sistemas simples, debido a que eran diseñadas para ser controladas de forma manual, por tal motivo los operarios se exponían a una gran cantidad de riesgo derivado del entorno y de las características de trabajo, siendo necesaria la intervención humana en cada una de las etapas de producción.

Tan pronto los procesos industriales requerían de mayores volúmenes de producción se fueron implementando sistemas básicos de automatización muy limitados, además de ser ineficientes y tener fallas constantes. Las maquinarias industriales de hoy en día están obligadas a utilizar nuevos sistemas de control automatizados, los cuales se basan principalmente en un dispositivo denominado PLC (Programmable Logic Controller). El PLC es una de las herramientas que ha permitido que la maquinaria y los sistemas electrónicos funcione de manera autónoma, por medio de instrucciones lógicas y de control que previamente son programadas, sin embargo, el PLC comenzó como un reemplazo para los sistemas de control de relés cableados, donde gradualmente se agregaron diferentes funciones de manipulación matemática y lógica.

El desarrollo de este escrito tiene como finalidad describir el proceso de diseño electrónico de un PLC, dando comienzo con la importancia del desarrollo de un dispositivo alternativo para la automatización de una desterronadora-cernidora de arcilla, indicando diversas ventajas que conlleva su implementación, después se describe un análisis de los requerimientos eléctricos y electrónicos del hardware para posteriormente definir los objetivos del proyecto, justificación y las delimitaciones que tendrá. En seguida se recopila la información necesaria que servirá como sustento teórico en el desarrollo de la investigación, presentando estudios relacionados y definiendo términos esenciales. En los capítulos siguientes del presente documento se detallan los procedimientos y actividades realizadas, donde se diseña el circuito electrónico, los resultados del desarrollo del proyecto y por último los resultados finales.

# CAPÍTULO I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

## 1.1. Planteamiento del problema

Hoy en día existe una gran variedad de compañías dedicadas al diseño y manufactura de Controladores Lógicos Programables, cada una con diferente enfoque filosófico en sus arquitecturas de control, pero al mismo tiempo incorporando mejoras de hardware y software, convirtiéndose en dispositivos indispensables para los sectores de manufactura, no obstante, su implementación en maquinarias y en líneas de producción industriales implica grandes gastos. Sin embargo, se pueden desarrollar soluciones alternativas, sin carecer los elementos y funcionalidades de un PLC, que cumplen con el mismo propósito de automatizar líneas industriales y maquinarias del sector productivo, además de que su costo reduce sustancialmente y podría estar al alcance de pequeñas y medianas industrias que comienzan a poner en marcha procesos de fabricación automáticos.

Por tal motivo, este proyecto se enfoca en el diseño de un Controlador Lógico Programable, en el cual se emplea un Microcontrolador que integra un procesador ARM Cortex-M4, siendo una tecnología con gran impacto en el ramo de la electrónica, además de tener como finalidad llevar a cabo su fabricación y ensamble, reduciendo costos significativos en la aplicación del proyecto.

## 1.2. Hipótesis

La aplicación de un microcontrolador ARM Cortex-M4 permitirá desarrollar un PLC que compita funcionalmente con las propuestas comerciales.

## 1.3. Objetivo General

Diseñar la tarjeta de circuito impreso (PCB) de un PLC utilizando un microcontrolador ARM Cortex-M4® que sea programado por USB, para su uso en aplicaciones de potencia o industriales.

#### 1.4. **Objetivos específicos**

- I. Establecer los requerimientos de hardware de un Controlador Lógico Programable (PLC) para ser implementados en una tarjeta de circuito impreso.
- II. Diseñar los circuitos de control y potencia, incorporando los requisitos necesarios para su implementación, haciendo uso de un microcontrolador modelo STM32F407VGT6 como principal unidad de procesamiento.
- III. Desarrollar la tarjeta de circuito impreso (PCB) en el software de Altium Designer®, aplicando reglas de diseño necesarias que permiten erradicar equivocaciones en su fabricación.
- IV. Validar que el diseño cumpla con los requerimientos establecidos, además de verificar que su modelo sea compacto y se ajuste a las exigencias del proyecto.
- V. Generar los archivos Gerber, donde se contiene la información necesaria para su fabricación.

#### 1.5. **Justificación**

El presente proyecto de diseño de un PLC basado en un microcontrolador ARM ha sido desarrollado con la finalidad de proponer una alternativa tecnológica a un bajo costo que permita la automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla, debido a que obtener dispositivos comerciales resulta ser muy costoso, dando como resultado que el sector productivo industrial mexicano en su mayor parte siga implementando maquinarias manuales. Por lo que también se busca impulsar el desarrollo de tecnología mexicana en beneficio de la región, logrando automatizar gran parte de los procesos de manufactura a un costo menor sin necesidad de adquirir equipos extranjeros, además de mejorar la productividad y la calidad de los productos.

#### 1.6. **Alcance del proyecto**

El alcance del proyecto es completar el diseño de la placa de circuito impreso, por lo que este trabajo concluye con la entrega de los archivos que se requieren para su manufactura.

## 1.7. **Delimitación del proyecto**

El diseño del PLC no cuenta con entradas y salidas analógicas, sin embargo, tiene un puerto de expansión dedicado a conectar una segunda tarjeta con circuitos electrónicos que permitan disponer entradas y salidas analógicas.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco Histórico

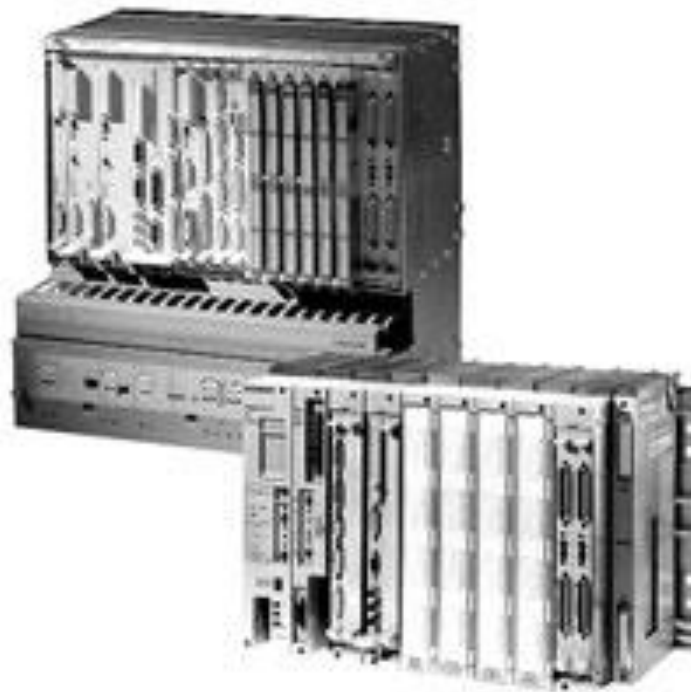
La historia de los autómatas programables inició en los años 60's, sin embargo, hoy en día son indispensables en la mayor parte de los sectores de manufactura para la automatización de procesos industriales. El comienzo de los PLC por sus siglas en inglés (Programmable Controller Logic) surgió cuando la división Hydramatic de General Motors Corporation especificó los criterios de diseño para el primer controlador programable en 1968. Su objetivo principal era eliminar los altos costos asociados con los sistemas inflexibles controlados por relé. Las especificaciones requerían un sistema de estado sólido con flexibilidad informática capaz de subsistir en un entorno industrial, ser fácil de programar y que su mantenimiento pudiera ser realizado por ingenieros y técnicos de planta, y también ser reutilizable. (L. A. Bryan, 1998) Algunos de los requisitos y especificaciones iniciales incluían lo siguiente:

- El nuevo sistema de control tenía que ser competitivo en precio con el uso de los controles de relé tradicionales.
- El sistema tenía que ser capaz de soportar un entorno industrial.
- Las interfaces de entrada y salida tenían que ser fácilmente reemplazables.
- El método utilizado para programar el controlador tenía que ser simple, para que el personal de la planta pudiera entenderlo fácilmente.

La implementación de esta tecnología estaba en marcha en el año 1968 para satisfacer las necesidades de Hydramatic de General Motors Corporation y para 1969 el controlador programable tuvo sus primeros descendientes. Estos primeros controladores cumplieron con las especificaciones originales y abrieron la puerta al desarrollo de una nueva tecnología de control. Los primeros PLC ofrecieron la funcionalidad de relé y de esta manera reemplazar la lógica de relé cableada original, que usaba dispositivos operados eléctricamente para cambiar mecánicamente los circuitos eléctricos. Estos controladores se instalaron fácilmente, ocuparon

menos espacio y fueron reutilizables. La programación del controlador, aunque era poco tediosa, tenía un estándar de planta reconocible: el formato de diagrama de escalera. (L. A. Bryan, 1998)

Poco tiempo después varias corporaciones comenzaron a trabajar para proporcionar una solución al problema. Bedford Associates, Inc. de Bedford, Massachusetts, que incluía a Richard Morley, Mike Greenberg, Jonas Landau, George Schwenk y Tom Boissevain, se encontraban trabajando en el diseño de una unidad, cuyas características incluían un diseño modular y resistente, el uso sin interrupciones para el procesamiento, así como el mapeo directo en la memoria, el cual Bedford sugirió que llamaran (MODICON) al controlador digital modular. MODICON 084 fue el primer PLC que entró en producción comercial y la clave de su éxito fue probablemente el lenguaje de programación, LD, que se basaba en los diagramas de relés con los que estaban familiarizados los electricistas. (Hanssen, 2015) El Modicon 084 constaba de tres componentes distintos que incluían la placa del procesador, la memoria y la placa de resolución lógica, que resolvían los algoritmos dominantes asociados con la lógica de escalera.



**Figura 1.** PLC MODICON 084.

Fuente y elaboración: Electrónica Unicrom. Historia del PLC, Modicon, Modbus.

Para 1971, Odo Struger y Ernst Dummermuth, ingenieros de Allen-Bradley, habían comenzado a desarrollar un nuevo concepto que incluía mejoras basadas en las necesidades del cliente. Este nuevo concepto fue conocido como el Boletín 1774 PLC. Allen-Bradley nombró a este nuevo dispositivo como Controlador lógico programable. La terminología de PLC se convirtió en el estándar industrial, especialmente cuando la PC se asoció con las computadoras personales. (Vanessa Romero Segovia, 2013) Asimismo, en el transcurso de esos años Modicon continuaba ganando experiencia a través de su diseño Modicon 084 y basado en su trayectoria, el ciclo de diseño de Michael Greenberg y las ideas de marketing de Lee Rousseau, surgió un nuevo desarrollo, el cual nombraron Modicon 184 en el año de 1973. El nuevo modelo no solo satisfacía las necesidades del mercado y los clientes, sino que también produjo el despegue de la empresa Modicon, situándola como líder inicial en el mercado. Por otro lado, las comunicaciones también experimentaron un rápido desarrollo, debido al aumento de la demanda de los PLC pudieran comunicarse entre sí y que pudieran colocarse lejos de las líneas de producción reales. Alrededor de 1973, Modicon desarrolló un protocolo de comunicaciones al que llamaron Modbus. Esto hizo posible establecer comunicaciones entre los PLC y, por lo tanto, pudieron ubicarse fuera de la producción. Modbus de Modicon también se proporcionaba para la gestión de señales analógicas. (Hanssen, 2015)

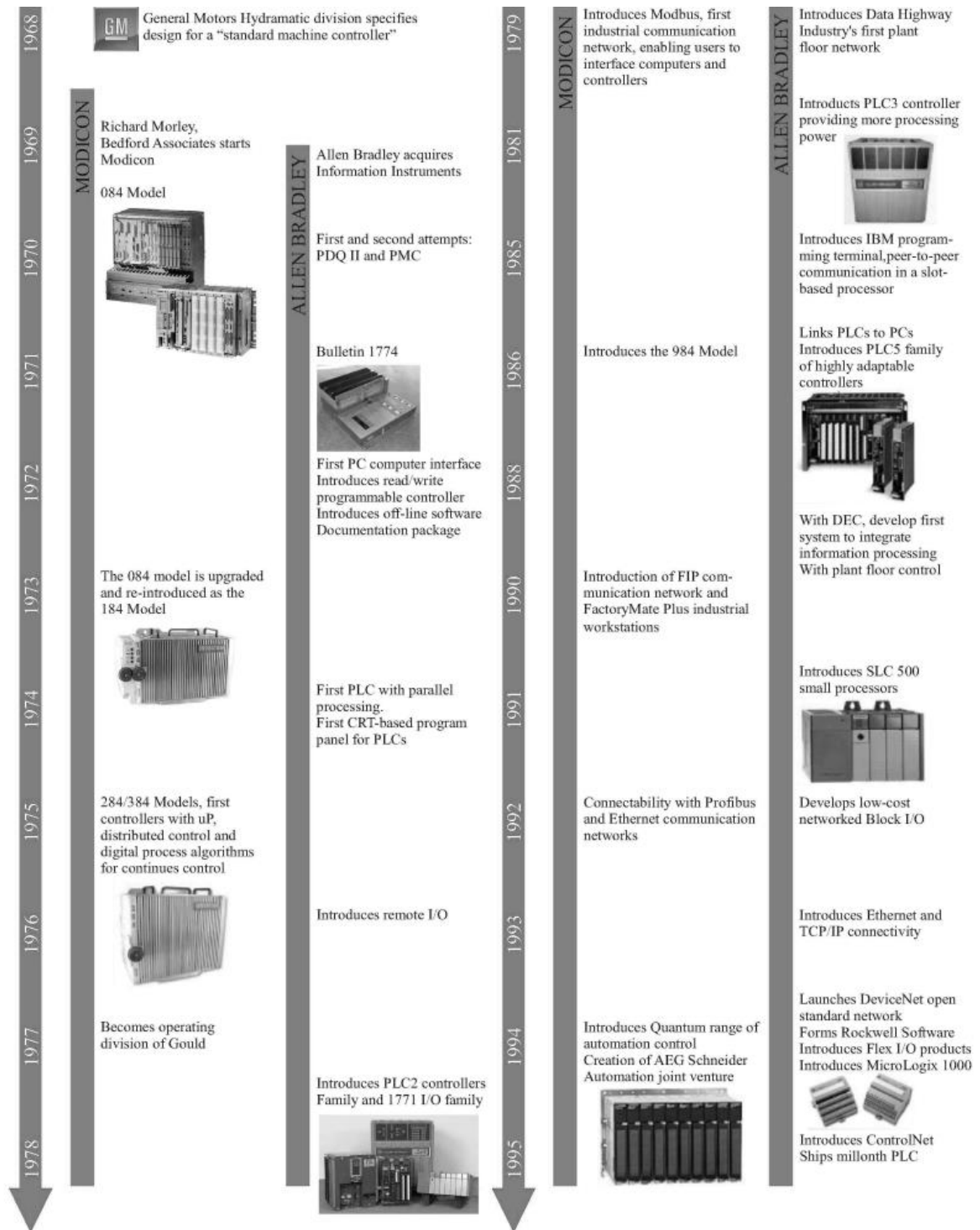


**Figura 2.** Modicon 184, segundo controlador programable de Modicon en 1973.  
Fuente: (Vanessa Romero Segovia, 2013).



A principios de los años 80's se generó una polinización entre los PLC y los sistemas de control distribuido (DCS). En esa época los PLC comenzaron a incorporar funciones de control distribuido para que pudieran vincularse de la misma manera que se vinculaban los DCS, y por lo tanto las empresas de software surgieron en gran número durante este tiempo. Una década más tarde la falta de estandarización, junto con el continuo desarrollo tecnológico, hizo que la comunicación PLC se convirtiera en una pesadilla de protocolos incompatibles y varias redes físicas. Por esta razón, la mayor parte de lenguajes de programación fueron incorporados al estándar internacional IEC 61131-3 (Comisión Electrotécnica Internacional, 2013). El estándar también define el lenguaje gráfico del diagrama de bloques de funciones (FBD) y el lenguaje de texto estructurado (ST). El lenguaje FBD constaba de una paleta de símbolos que se basa en símbolos y funciones reconocidos de la tecnología digital, mientras que el ST era considerado un lenguaje de alto nivel que proporcionaba asociaciones con Pascal y C. Antes de que apareciera el estándar IEC 61131-3, y durante muchos años después, había diferencias relativamente grandes entre los PLC de varios fabricantes. Esto fue particularmente cierto en el caso de las capacidades para la selección del lenguaje de programación y cómo se diseñó el lenguaje que se implementó en los PLC. (Hanssen, 2015)

Para concluir los antecedentes históricos, es importante reconocer que fue Richard Morley considerado el padre del controlador programable, debido a que se le atribuye el diseño del controlador lógico programable de lógica de escalera y el desarrollo de la programación del mismo. Además de que Odo Josef Struger a menudo llamado el padre de Allen-Bradley PLC y acreditado con la creación del PLC asíncrono, quien, en la década de 1950, se convirtió en ingeniero en Allen-Bradley en 1958 y en 1997 fue nombrado vicepresidente de tecnología de Rockwell Automation. Aunque actualmente existen una gran cantidad de fabricantes de PLC, las que tuvieron mayor impacto en la historia de los PLC fueron Modicon y Allen-Bradley. (Vanessa Romero Segovia, 2013) En la siguiente figura se muestra una línea de tiempo donde se muestra la evolución de los dos fabricantes.



**Figura 3.** Línea del tiempo de Modicon y Allen-Bradley (1968-1995).

Fuente: (Vanessa Romero Segovia, 2013).

## 2.2. Estructura teórica que sustenta el estudio

A continuación, se presenta una investigación teórica de los conceptos más relevantes que sustentan el desarrollo del proyecto.

### 2.2.1. Controlador Lógico Programable (PLC)

Los Controladores Lógicos Programables tuvieron comienzo para sustituir los sistemas tradicionales de control de relés cableados y paulatinamente se introdujeron funciones de manipulación lógica y matemática. Ahora son la tecnología de control de procesos industriales más utilizada.

#### 2.2.1.1. Introducción

Actualmente, todos o la mayor parte de los aspectos de la industria, desde la generación de energía hasta el desarrollo de automóviles y envasado de alimentos, utilizan Controladores Lógicos Programables para aumentar y mejorar la producción y calidad de los productos. El controlador lógico programable es básicamente una computadora digital diseñada para su uso en el control de máquinas que, a diferencia de una computadora personal, ha sido diseñado para operar en el entorno industrial y está equipado con interfaces especiales de entrada/salida y una programación de control. (Frank D, 2011)



**Figura 4.** Controlador Lógico Programable (PLC).

Fuente: (Frank D, 2011)

Debido a que la estructura de un PLC se basa en los mismos principios que los utilizados en la arquitectura de una computadora, es capaz no solo de realizar tareas de conmutación de relés, sino también de realizar otras aplicaciones, como temporización, conteo, cálculo, comparación y procesamiento de señales analógicas. También el controlador programable ha eliminado gran parte del cableado asociado con los circuitos de control de relés convencionales, siendo más pequeño y económico en comparación con los sistemas equivalentes de control de procesos basados en relés. Aunque los sistemas de control modernos todavía incluyen relés, pero esta rara vez se usan para la lógica. (Frank D, 2011)

#### **2.2.1.2. Clasificación**

Los PLC pueden tener distintos tipos de clasificación, sin embargo, (Daneri, 2008) señala que se pueden clasificar por su construcción; refiriendo a los PLC compactos y modulares y por otro lado por su capacidad y cantidad de entradas y salidas.

##### **Construcción:**

- **Compactos:** Conservan todas sus partes en un mismo gabinete como interfaces de entrada y salida, CPU y fuente de alimentación. Esta construcción únicamente se encuentra en controladores con una baja cantidad de E/S y comúnmente son llamados micro PLC.
- **Modulares:** Sus partes como CPU, fuente de alimentación, interfaces de E/S son compatibles, debido a que se arman sobre un bastidor o una base de montaje, lo que permite conformar un PLC dependiendo de su aplicación. Su capacidad de expansión es superior a la de los compactos y disponen de una mayor flexibilidad.

##### **Capacidad y cantidad de E/S**

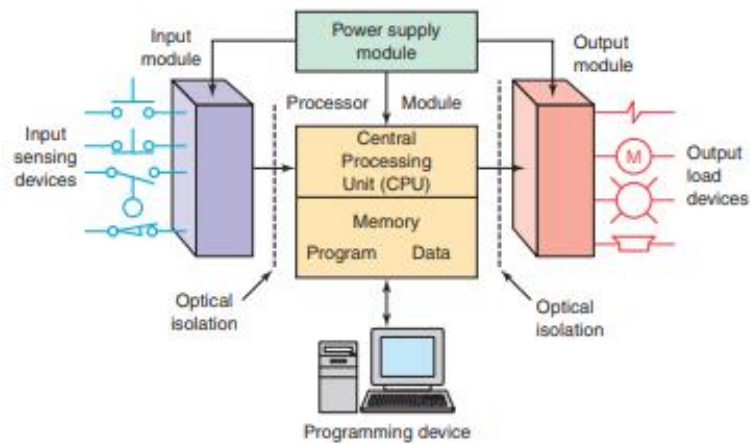
(Daneri, 2008) establece que no se puede establecer una clasificación precisa en cuanto a la capacidad, debido a que los fabricantes ofrecen diferentes características como, por ejemplo; el tamaño de memoria, la cantidad de puertos de comunicación, el conjunto de protocolos de

comunicación, entre otras. De esta manera (Daneri, 2008) permite clasificar a los PLC de la siguiente forma:

- Micro PLC: hasta 64 E/S.
- PLC pequeño: de 65 a 255 E/S.
- PLC mediano: de 255 a 1023 E/S.
- PLC grande: más de 1024 E/S.



a)



b)

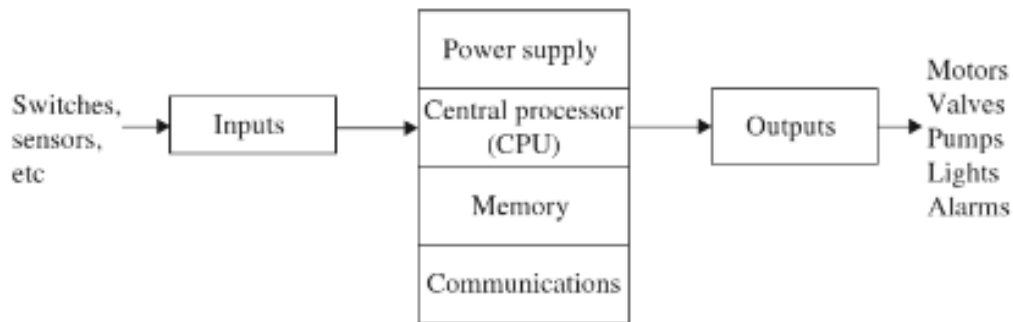
**Figura 5.** a) PLC de tipo modular, b) Estructura de un PLC modular.

Fuente: (Frank D, 2011)

### 2.2.1.3. Estructura

Existe una gran cantidad de tipos de PLC, desde pequeños que tienen una capacidad de memoria y cálculo baja y la expansión del número de Entradas y Salidas (E/S) es limitada hasta

PLC's que pueden llegar a tener un gran número de E/S y con la capacidad de ejecutar tareas simultáneamente, sin embargo, la estructura de ambos es la misma, por lo que (Hanssen, 2015) considera que esquemáticamente se puede dividir en seis unidades principales, como se muestra en la siguiente figura.



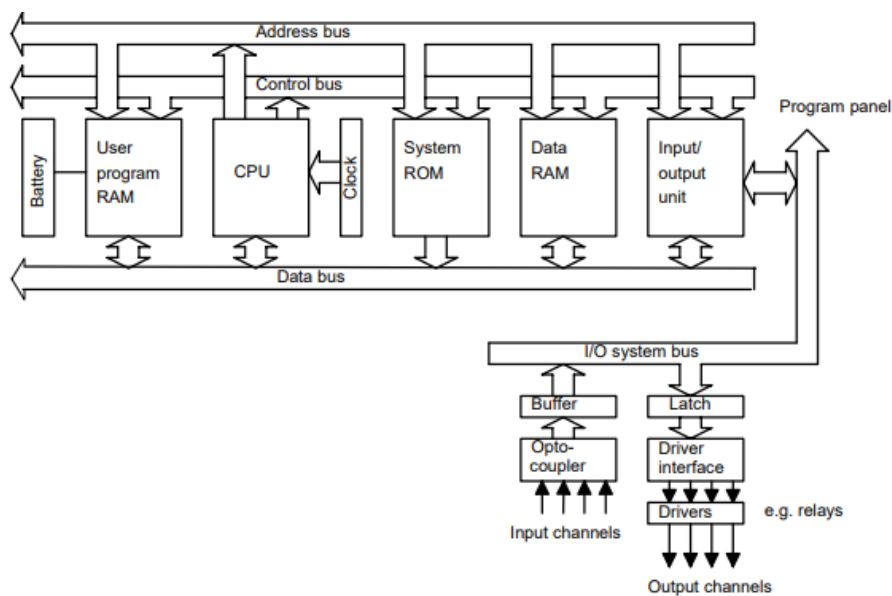
**Figura 6.** Representación esquemática a bloques de la estructura de un PLC.

Fuente: (Hanssen, 2015)

Por lo tanto, las partes principales incluyen a la una unidad central de procesamiento (CPU), memoria, fuente de alimentación, módulos para recibir y transmitir datos (interfaces de E/S), y módulos de comunicaciones. También es posible agregar pantallas/luces indicadoras ya que la mayoría de los PLC incorporan LED que indican el estado del PLC y/o las E/S digitales. Las unidades principales están conectadas entre sí con cables o tiras de cobre llamadas buses. Todas las comunicaciones entre las partes principales del PLC se realizan a través de estos buses. Un bus es una conexión de varios cables, por ejemplo, ocho, donde la información se transfiere en forma binaria. Por lo general, un PLC tendrá cuatro buses: bus de direcciones, bus de datos, bus de control y bus del sistema: El bus de datos se utiliza para la transferencia de datos entre la CPU, la memoria y la E/S. mientras que el bus de dirección del bus se utiliza para transferir las direcciones de memoria de las que se obtendrán los datos. Una dirección puede indicar, por ejemplo, una ubicación hasta una palabra en un registro particular. Un bus de direcciones de 16 líneas y puede transferir 265536 direcciones diferentes. El bus de control se utiliza para sincronizar y controlar los circuitos de tráfico. (Hanssen, 2015)

#### 2.2.1.4. Arquitectura interna

La arquitectura interna fundamental de un PLC, consiste en una unidad central de procesamiento (CPU) que contiene el microprocesador del sistema, la memoria y los circuitos electrónicos de E/S. La CPU tiene el objetivo de controlar y procesar todas las operaciones dentro del PLC, se suministra con un reloj con una frecuencia típicamente entre 1 y 8 MHz. Esta frecuencia determina la velocidad de funcionamiento del PLC y proporciona la temporización y sincronización de todos los elementos del sistema. La información dentro del PLC es transportada por medio de señales digitales. Las rutas internas a lo largo de los cuales fluyen las señales digitales se denominan buses. Un bus, en el sentido físico es una serie de conductores a lo largo de los cuales pueden fluir señales eléctricas, estos pueden ser pistas en una placa de circuito impreso o cables. La CPU utiliza el bus de datos para enviarlos entre los elementos constitutivos, mientras que el bus de direcciones se utiliza para enviar las direcciones de las ubicaciones para acceder a los datos almacenados y el bus de control para las señales relacionadas con las acciones de control interno. El bus del sistema se utiliza para las comunicaciones entre los puertos y unidades de E/S. (Bolton, 2006)



**Figura 7.** Arquitectura típica de un PLC.

Fuente: (Bolton, 2006)

### **2.2.1.5. Principios de funcionamiento**

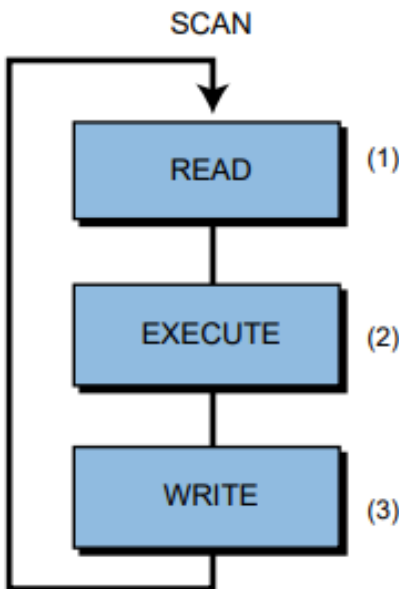
Para poder comprender el funcionamiento de un PLC se tiene que tener en cuenta los componentes que lo conforman. Sin embargo, (L. A. Bryan, 1998) indica que la operación de PLC es relativamente simple. El sistema de entrada/salida se encuentra físicamente conectado a los dispositivos de campo que se encuentran en la máquina o que se utilizan en el control de un proceso. Estos dispositivos de campo pueden ser dispositivos de entrada/salida discretos o analógicos, como interruptores de límite, transductores de presión, pulsadores, arrancadores de motor, solenoides, sensores, etc. Las interfaces de E/S proporcionan la conexión entre la CPU y los distribuidores de información correspondientes a las entradas y los dispositivos controlables que corresponden a las salidas. Durante su operación, la CPU completa tres procesos:

1. Lectura de los datos de entrada de los dispositivos de campo a través de las interfaces de entrada,
2. Lleva a cabo la ejecución del programa de control almacenado en el sistema de memoria.
3. Escribe o actualiza los dispositivos de salida a través de las interfaces de salida. Este proceso de lectura secuencial de las entradas, ejecución del programa en la memoria y actualización de las salidas se conoce como escaneo.

Por otro lado, el sistema de entrada/salida forma la interfaz mediante la cual los dispositivos de campo se conectan al controlador. El objetivo principal de la interfaz es condicionar las diversas señales recibidas o enviadas a dispositivos de campo externos. Las señales entrantes de los sensores (botones pulsadores, interruptores de límite, sensores analógicos, interruptores selectores e interruptores giratorios) se conectan a terminales en las interfaces de entrada. Los dispositivos que se controlarán, como arrancadores de motor, válvulas solenoides, luces piloto y válvulas de posición, se conectan a los terminales de las interfaces de salida. La fuente de alimentación del sistema proporciona los voltajes necesarios para el correcto funcionamiento de las distintas secciones de la unidad central de procesamiento (L. A. Bryan, 1998).



En la siguiente figura se muestra un diagrama a bloques que representa los tres procesos de escaneo de un PLC.



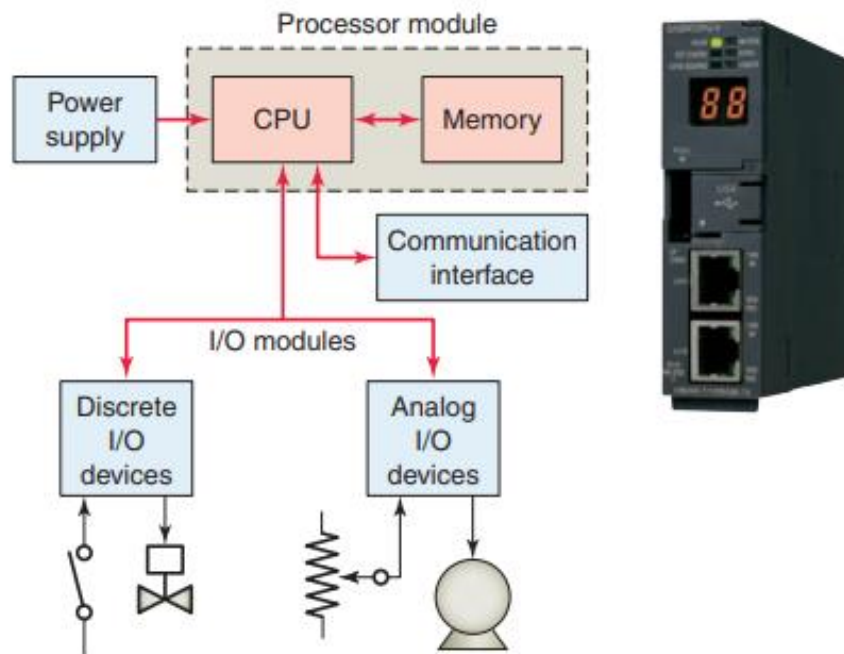
**Figura 8.** Representación de escaneo de un PLC.

Fuente: (L. A. Bryan, 1998)

#### **2.2.1.6. Unidad Central de Procesamiento (CPU)**

La unidad central de procesamiento (CPU) es el cerebro del controlador programable, debido a que es el encargado de la toma todas las decisiones relativas al control de una máquina o proceso. La CPU de una unidad aritmética y lógica (ALU) que se encarga de la manipulación de datos y de realizar operaciones aritméticas de suma y resta y operaciones lógicas, también consta de una memoria ubicada dentro del microprocesador, es utilizada para almacenar información involucrada en la ejecución del programa, además de una unidad de control que se utiliza para controlar el tiempo de las operaciones. Durante la operación, la CPU recibe información de varios dispositivos de detección, toma decisiones lógicas basadas en el programa almacenado en la memoria y controla los dispositivos de salida de acuerdo con los resultados de la lógica programada. Este proceso de leer las entradas, ejecutar el programa y controlar las salidas se conoce como exploración cíclica. (Jones, 1996)

En la siguiente figura se muestran las secciones de una Unidad Central de Procesamiento (CPU) de un PLC.



**Figura 9.** Sección de CPU de un PLC.

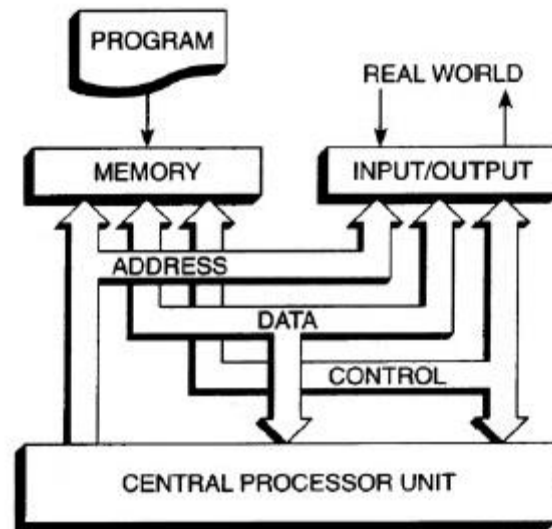
Fuente: (Frank D, 2011)

### 2.2.1.7. Buses

Los buses son las rutas utilizadas para la comunicación dentro del PLC. La información se transmite en forma binaria. El sistema cuenta con cuatro buses y cada uno de los bits se comunica simultáneamente a lo largo de su propio cable paralelo.

1. Bus de datos: transporta los datos utilizados en el procesamiento realizado por la CPU.
2. Bus de direcciones: se utiliza para transportar las direcciones de las ubicaciones de memoria, con la finalidad de que cada palabra pueda ubicarse en la memoria, a cada ubicación de memoria se le asigna una dirección única.
3. Bus de control: transporta las señales utilizadas por la CPU para el control y poder informar a los dispositivos de memoria si van a recibir datos de una entrada o salida de datos y para transportar señales de tiempo utilizadas para sincronizar acciones.

4. Bus del sistema: se utiliza para las comunicaciones entre los puertos y unidades de entrada/salida.



**Figura 10.** Buses de un PLC.

Fuente y colaboración: Elprocus Electronics. Diferentes tipos de PLC con aplicaciones.

#### **2.2.1.8. Memoria**

La dimensión de la memoria varía de una marca de PLC a otra, sin embargo, la memoria en ocasiones se puede ampliar instalando una tarjeta de memoria adicional. Por lo cual (Hanssen, 2015) señala que un PLC normalmente tendrá las siguientes unidades de memoria:

- Memoria de solo lectura (ROM): tiene como fin el almacenamiento permanente del sistema operativo y los datos del sistema, debido a que la información almacenada en una ROM no se puede borrar, para ello se utiliza una ROM programable borrable (EPROM). De esta forma, es posible actualizar el sistema operativo de un PLC.
- Memoria de acceso aleatorio (RAM): ofrece el almacenamiento de programas, porque una RAM es más rápida. Dado que la información en una RAM no se puede mantener sin corriente, por lo que los PLC tienen una batería para que el código del programa no se pierda en caso de un corte de energía. Algunos PLC

también tienen la capacidad de almacenar programas en una EPROM. Las memorias RAM también se utilizan cuando se ejecuta el código del programa y son utilizadas para guardar valores de E/S y los estados de temporizadores y contadores.

ROM	Operating system
Built-in RAM	Data
	Program
	Constants
FLASH EPROM	User program backup

**Figura 11.** Tarjeta de memoria típica de un PLC.

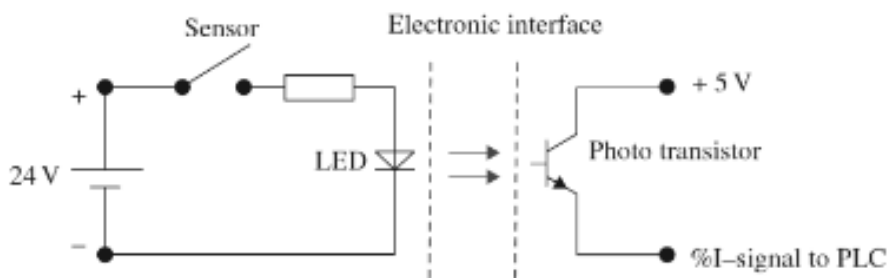
Fuente: (Hanssen, 2015)

### 2.2.1.9. Entradas y salidas

El sistema de entradas y salidas de un PLC es indispensable para su funcionamiento, debido a que es el contacto entre el PLC y el mundo exterior, además está diseñado para recibir varios tipos de señales y poder transmitir señales en distintos formatos. Existen bloques de entrada y salida para señales analógicas y digitales, sin embargo, algunos PLC incorporan bloques para fines especiales, esto dependerá del tipo y modelo del controlador programable. Cada entrada y salida tiene una dirección única que se puede utilizar en el código del programa. los módulos de E/S se encargan del aislamiento eléctrico para proteger el PLC y, a menudo, tienen funciones integradas para el procesamiento de señales.

**Entradas:** Las señales de entrada digital generalmente tienen un voltaje de 24 VCC, mientras que el voltaje interno en el PLC es de 5 V. Para proteger la electrónica en el PLC, los módulos de entrada generalmente usan acopladores ópticos. Un acoplador óptico consta

principalmente de un diodo emisor de luz y un fototransistor. Cuando la señal en el circuito de entrada es lógicamente alta, el LED emitirá una luz infrarroja que a su vez activa el transistor y da como resultado una señal lógicamente alta en los circuitos electrónicos del módulo, donde el potencial es de 5V. El espacio entre el LED y el fototransistor separa el circuito externo del interno con la electrónica en el módulo. Los componentes electrónicos internos están así protegidos de modo que, aunque el PLC funcione a 5 V internamente, es posible utilizar niveles de tensión en la entrada desde 5 hasta 230 V. La cantidad de corriente que puede manejar una entrada individual depende de las especificaciones de ingeniería del módulo de entrada en cuestión. Sin embargo, rara vez esto es significativo porque la mayoría de los sensores tienen una corriente de operación baja. (Hanssen, 2015)



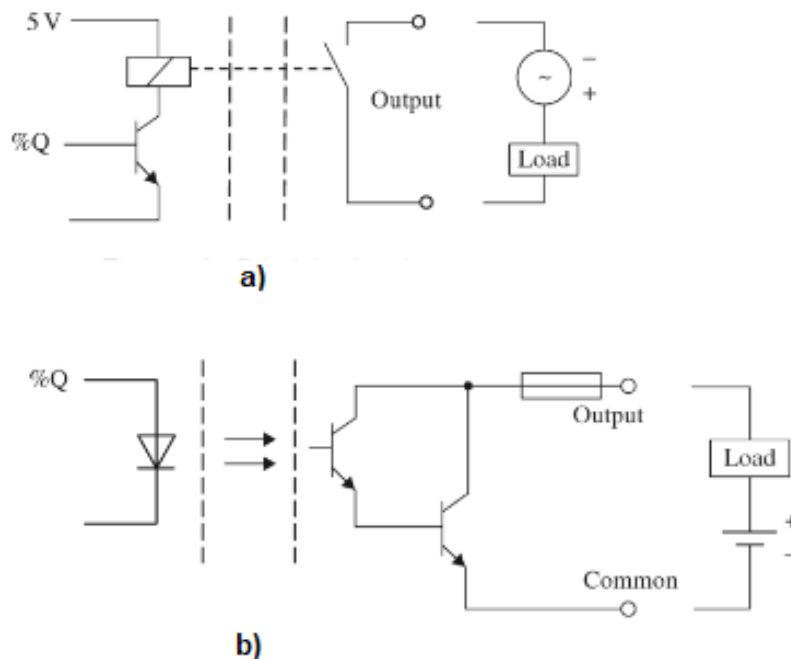
**Figura 12.** Diagrama de la interfaz de entrada optoacoplada de un PLC.

Fuente: (Hanssen, 2015)

**Salidas:** Los módulos de salida digital comúnmente se encuentran de tres maneras, según el criterio de (Hanssen, 2015). Estas son: salidas tipo relé, salidas de transistores y salidas triac.

- Salidas a relé: Este tipo de salida tiene la ventaja de que puede manejar grandes cargas y puede conectarse a cargas de CC y CA a diferentes voltajes. Cuando la CPU establece una salida lógicamente alta, el relé de salida asociado en el módulo en cuestión se cierra y el circuito externo al que está conectada la carga se completa. Además, el relé proporciona aislamiento entre el PLC y los circuitos externos.

- Salidas de transistor: Estos módulos usan transistores para completar los circuitos externos por lo que su conmutación electrónica es significativamente más rápida que los módulos de relé, que conmutan con relés mecánicos y también suelen ser más económicos. Una desventaja de las salidas de transistor es que, a menos que se utilice un relé externo adicional, solo se pueden utilizar para conmutar corriente continua. Además de no manejar polaridad incorrecta, por lo que son particularmente sensibles a la sobrecarga. Por lo tanto, se utilizan fusibles con electrónica integrada para proteger estas salidas. Los acopladores ópticos también se utilizan para el aislamiento eléctrico. (Hanssen, 2015)
- Salidas de triac: No son muy comunes en los PC, sin embargo, se utilizan en situaciones que requieren un cambio rápido de C.A. Estas salidas también son extremadamente sensibles a las sobre corrientes y están protegidas con fusibles.



**Figura 13.** Diagrama de la interfaz de salida optoacoplada de un PLC a) de tipo relé b) de tipo transistor.

Fuente: (Hanssen, 2015)

## **2.2.2. Microcontroladores**

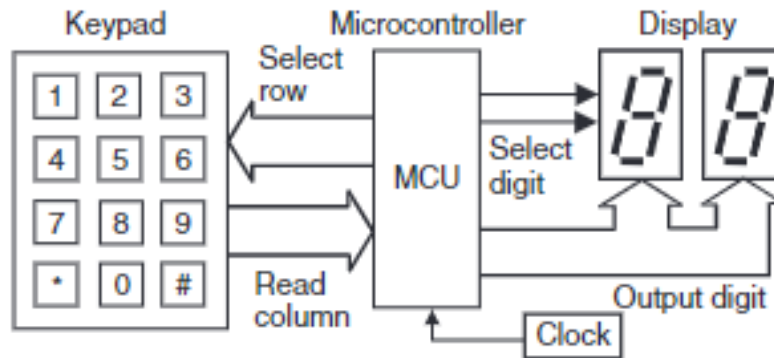
El desarrollo de los microcontroladores ha causado gran atención por parte de ingenieros e investigadores involucrados en aplicaciones de automatización y control, debido a su gran rendimiento y eficiencia. Como resultado de la evolución de los microcontroladores, se han incorporado diferentes tipos de aplicaciones en distintos campos, tales como aplicaciones médicas, sistemas de automatización, comunicaciones inalámbricas y sistemas de control.

### **2.2.2.1. Introducción**

Para comenzar con el estudio de los microcontroladores primero se tiene que tener en claro que el término microcomputadora por lo general se describe como un sistema que incluye como mínimo un microprocesador, memoria de programa, memoria de datos y entrada y salida (E/S). Sin embargo, algunos sistemas de microcomputadoras incluyen componentes adicionales como temporizadores, contadores, convertidores de analógico/digital. Por lo tanto, un sistema de microcomputadora puede ser desde una gran computadora con discos duros, disquetes e impresoras, hasta un sistema de computadora de un solo chip.

Ahora bien, (Ibrahim, 2002) refiere a los microcontroladores como microprocesadores de propósito general que tienen partes adicionales que les permiten controlar dispositivos externos. Por lo cual, básicamente un microcontrolador ejecuta un programa de usuario que se carga en su memoria de programa. Bajo el control de este programa, los datos se reciben de dispositivos externos, se manipulan y luego se envían a dispositivos de salida externos. Un microcontrolador es una herramienta muy poderosa que permite a un diseñador crear sofisticados algoritmos de manipulación de datos de entrada y salida. Actualmente existen diferentes compañías dedicadas a la innovación y manufactura de microcontroladores, con diferentes características, funciones y encapsulados. La elección de un microcontrolador dependerá de la tarea que se desea desempeñar y de las variables que se requieran controlar. Usualmente los microcontroladores se clasifican por el número de bits en una palabra de datos.

En la siguiente figura se muestra un sistema de visualización de dos display utilizando un microcontrolador como principal dispositivo de procesamiento. Esta es una aplicación típica donde se implementa este tipo de tecnología.



**Figura 14.** Aplicación típica de un microcontrolador.

Fuente: (Bates, 2004)

### 2.2.2.2. Clasificación

Habitualmente los microcontroladores se caracterizan por la cantidad del conjunto de instrucciones, su amplitud de buses y estructura de memoria. Sin embargo, de forma general, los microcontroladores se pueden clasificar desde el número de bits, hasta su estructura de memoria, esto dependerá del criterio de cada autor. En seguida se describirán las posibles clasificaciones de los microcontroladores.

Clasificación según el número de bits:

- 8 bits: Son los que se utilizan con mayor frecuencia, debido a que este tamaño de palabra ha demostrado ser popular para la gran mayoría de las tareas que los dispositivos deben realizar.
- 16 bits: Ejecutan funciones con mayor precisión y rendimiento a comparación de los de 8 bits, debido a que el rango de datos para cada ciclo es mayor.
- 32 bits: Se emplean en dispositivos controlados automáticamente, incluidos dispositivos médicos, sistemas de control de motores, máquinas industriales y otros tipos de sistemas integrados por su gran capacidad de procesamiento.



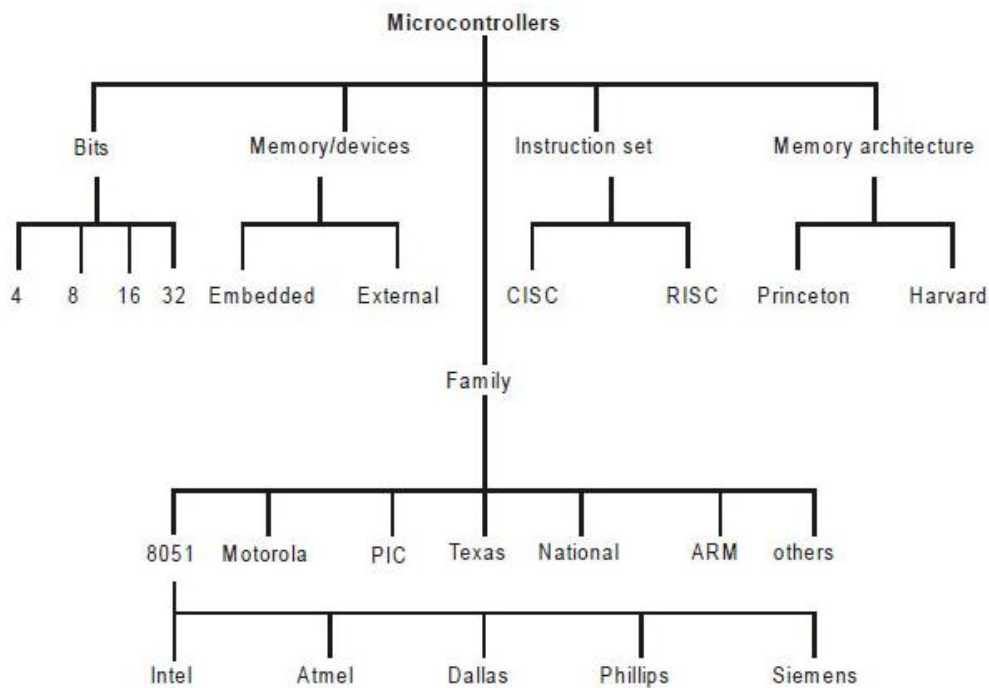
Clasificación según dispositivos de memoria:

- Microcontrolador de memoria integrada: Tiene memoria de programa y datos, puertos de E/S, comunicación en serie, contadores y temporizadores e interrupciones integrada en un mismo chip.
- Microcontrolador de memoria externa: Tiene una unidad de microcontrolador que no tiene todos los bloques funcionales disponibles en un único chip.

Clasificación según su arquitectura:

- RISC: Este tipo de arquitectura reduce el conjunto de instrucciones en el diseño del microprocesador para los estándares de la industria.
- CICS: Permite al programador usar una instrucción en lugar de muchas instrucciones más simples.

En la siguiente figura se muestran los tipos de microcontroladores clasificados por el número de bits, arquitectura de memoria y conjunto de instrucciones.

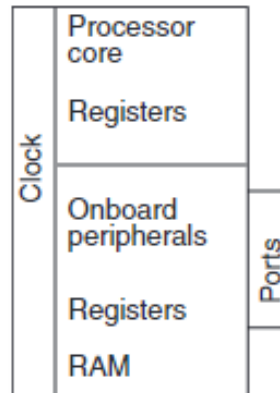


**Figura 15.** Clasificación de los tipos de microcontroladores.

Fuente y elaboración: En Ticians. Tipos de microcontroladores.

### 2.2.2.3. Estructura

Los microcontroladores de diferentes fabricantes tienen diferentes estructuras y capacidades. Algunos pueden adaptarse a una aplicación en particular, mientras que otros pueden ser totalmente inadecuados.



**Figura 16.** Partes generales que conforman a un microcontrolador

Fuente: (David Calcultt, 2004)

Algunas características de hardware de los microcontroladores en general se describen a continuación, las cuales define (Ibrahim, 2002).

**Reloj:** Todos los microcontroladores exigen el uso de un oscilador para su funcionamiento, menudo también es conocido como reloj. La gran mayoría de los microcontroladores funcionan con un oscilador y dos condensadores, algunos otros con resonadores.

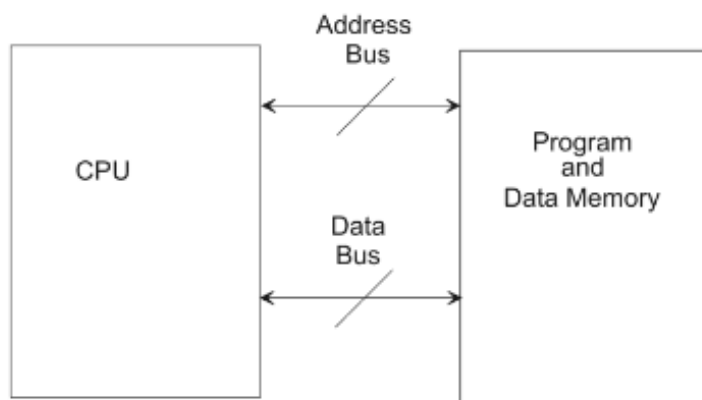
**Temporizadores:** Son parte importante de cualquier microcontrolador. Es un contador que funciona con un reloj preciso. La mayoría de los temporizadores se pueden configurar para generar una interrupción cuando alcanzan un cierto conteo. Además, se pueden utilizar para generar retrasos de tiempo en los programas. Algunos microcontroladores pueden tener tres o más, mientras que otros pueden tener solo dos temporizadores.

**Convertidor analógico/digital:** Usualmente generan interrupciones cuando se completa una conversión para que el programa del usuario pueda leer los datos convertidos muy



direcciones y buses de datos que utilizan. Se utilizan dos tipos de arquitecturas de CPU para diseñar microcontroladores: la arquitectura de Von Neumann y la arquitectura de Harvard.

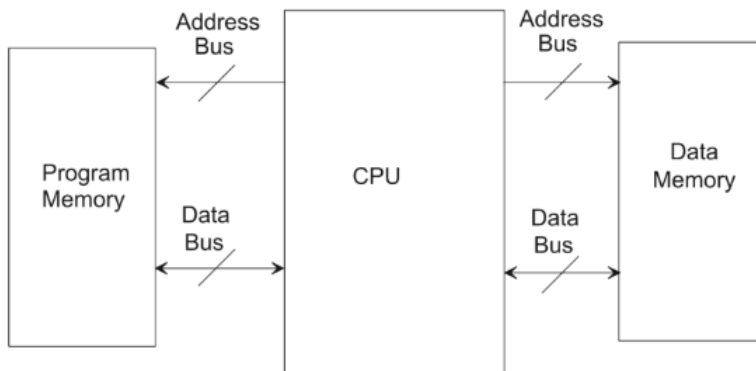
- Von Neumann: En esta arquitectura, el programa y los datos se almacenan juntos y se accede a ellos a través del mismo bus. Desafortunadamente, esto implica que los accesos al programa y a los datos pueden entrar en conflicto, lo que lleva a retrasos no deseados. (Gunther Gridling, 2007)



**Figura 18.** Arquitectura Von Neumann.

Fuente: (Rafiqzzman, 2018)

- Harvard: Esta arquitectura exige que el programa y los datos estén en memorias separadas a las que se accede a través de buses separados. En consecuencia, los accesos al código no entran en conflicto con los accesos a los datos, lo que mejora el rendimiento del sistema. (Rafiqzzman, 2018)

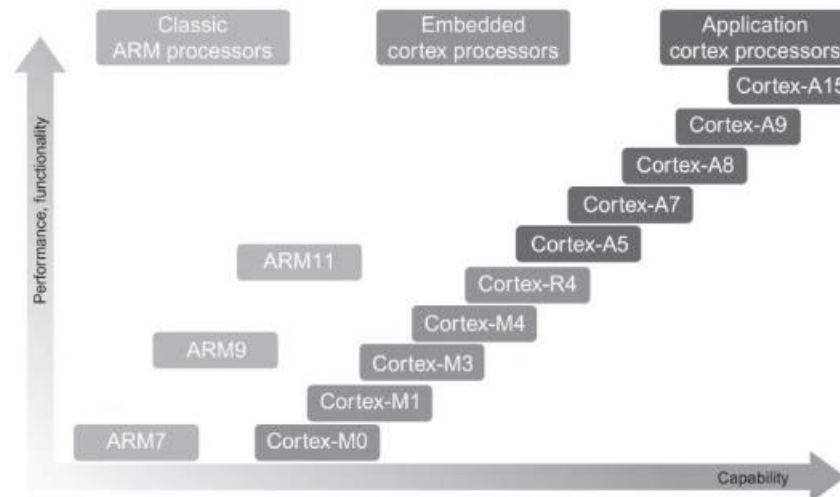


**Figura 19.** Arquitectura Harvard.

Fuente: (Rafiqzzman, 2018)

### 2.2.3. Microcontroladores basados en ARM

ARM es un microcontrolador de 32 bits cuyo núcleo está diseñado por ARM Limited con arquitectura RISC. ARM tiene arquitectura von Neumann programa, es decir, tiene el programa y memoria RAM en un mismo espacio. Los microcontroladores ARM se utilizan sumamente para ahorrar energía, debido a que tienen la capacidad de funcionar con un consumo de energía muy bajo. Uno de los diseños centrales más interesantes en la industria integrada es la familia ARM Cortex-M, que incluye una gama de modelos que van desde rentables y energéticamente eficientes hasta núcleos de alto rendimiento diseñados específicamente para microcontroladores multimedia. (Lacamera, 2018)



**Figura 20.** Evolución de la arquitectura ARM.

Fuente: (Joshi Vaibhav Vijay, 2015)

#### 2.2.3.1. Cortex-M

(Ibrahim, ARM-Based Microcontroller Projects Using MBED, 2019) señala que la serie Cortex-M se basa en la arquitectura ARMv6-M (Cortex-M0 y Cortex-M0+) y la arquitectura ARMv7-M (Cortex-M3 y Cortex-M4). Estos procesadores están diseñados específicamente para el mercado de microcontroladores y ofrecen respuestas de interrupciones rápidas y precisas, bajo consumo de energía, bajo costo, alto rendimiento de procesamiento y facilidad de uso. Cortex-M3 y Cortex-M4 tienen parecido en la arquitectura y tienen los mismos conjuntos de

instrucciones, con la diferencia de que Cortex-M4 ofrece capacidades de procesamiento de señal digital (DSP) y tiene una unidad de punto flotante opcional. Cortex-M4 con su DSP y capacidad de punto flotante es un procesador ideal para aplicaciones portátiles y de IoT. Para aplicaciones con inferior costo y de menor rendimiento, se puede usar el Cortex-M0 o el Cortex-M0+. El Cortex-M0+ tiene un bajo nivel de consumo más bajo a comparación del Cortex-M0, también se basa en un subconjunto del conjunto de instrucciones Thumb 2 y su rendimiento es ligeramente superior al de Cortex-M0 e inferior al de Cortex-M3 y Cortex-M4. Cortex-M7 es un procesador de alto rendimiento que puede manejar DSP rápido y operaciones de punto flotante de precisión simple o doble y se utiliza principalmente en aplicaciones donde se requiere un rendimiento superior al de Cortex-M4. En la tabla 1 se puede contemplar una pequeña comparación, en donde se describe brevemente toda la serie de microcontroladores Cortex-M.

**Tabla 1.** Descripción de la serie Cortex-M.

Processor	Description
Cortex-M7	High-performance processor, used in applications where Cortex-M4 is not fast enough, supports DSP and single and double precision arithmetic
Cortex-M4	Similar architecture as the Cortex-M3 but includes DSP and floating point arithmetic, used in high-end microcontroller-type applications
Cortex-M3	Very popular, low power consumption, medium performance, debug features, used in microcontroller-type applications
Cortex-M1	Designed mainly for programmable gate array applications
Cortex-M0+	Lower power consumption and higher performance than the Cortex-M0
Cortex-M0	Low power consumption, low to medium performance, smallest ARM processor

Fuente: (Ibrahim, ARM-Based Microcontroller Projects Using MBED, 2019)

### 2.2.3.2. Características de un MCU ARM Cortex-M4.

El procesador ARM Cortex-M4 es el más reciente procesador integrado de ARM. Fue desarrollado específicamente para abordar los mercados de control de señales digitales que exigen unas combinaciones eficientes y fáciles de usar, capacidades de control y procesamiento de señales. La serie de procesadores Cortex-M está diseñada para satisfacer las necesidades emergentes dirigidas especialmente en control de motores, en el sector automotriz, mercados de administración de energía, audio integrado y automatización industrial.

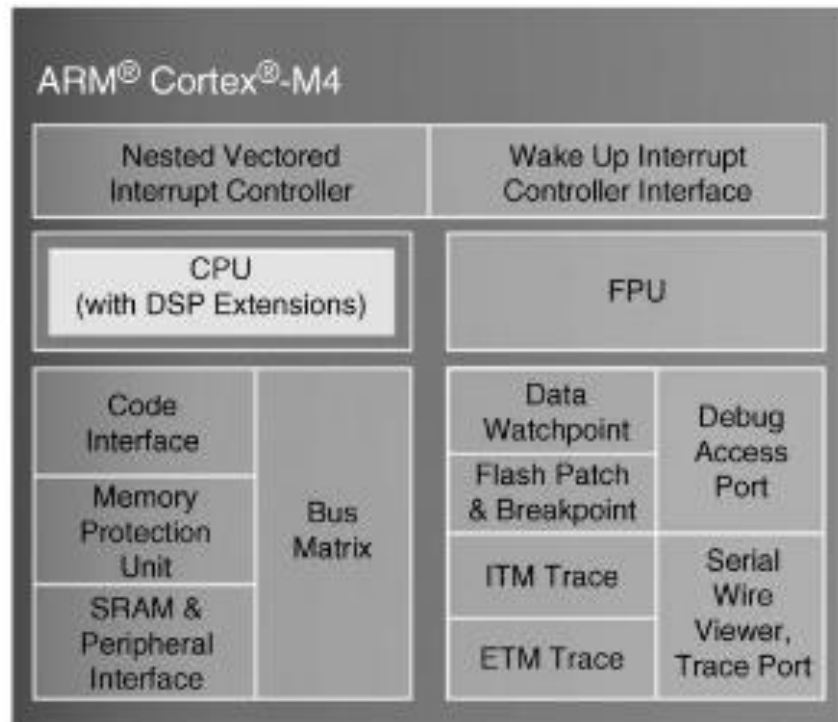
(Bai, 2016) menciona que el MCU ARM Cortex-M4 proporciona las siguientes características específicas:

- El procesador Cortex-M4 es un MCU de 32 bits, sin embargo, puede manejar 8 bits, 16 bits y 32 bits de manera eficiente.
- El MCU Cortex-M4 no incluye ninguna memoria, pero proporciona diferentes interfaces de memoria para la memoria flash externa y SRAMs.
- Debido a su longitud de datos de 32 bits, el espacio máximo de memoria de búsqueda es de hasta 4 GB. Para administrar y acceder de manera efectiva a este enorme espacio de memoria, se crean diferentes regiones para almacenar instrucciones y datos del sistema, instrucciones de los usuarios, datos y registros de dispositivos periféricos mapeados e interfaces relacionadas.
- El sistema de bus interno utilizado en Cortex-M4 MCU es de 32 bits y se basa en el llamado Estándar de arquitectura de bus de microcontrolador avanzado (AMBA). El estándar AMBA proporciona operaciones eficientes y bajo costo de energía en el hardware.
- La interfaz de bus principal entre la MCU y los componentes externos es Advanced High Bus de rendimiento (AHB), que proporciona interfaces para la memoria y el bus del sistema, así como para dispositivos periféricos.

Generalmente un procesador MCU Cortex M4 incorpora las siguientes partes:

- Unidad de punto flotante opcional (FPU).
- Interfaz Trace Macrocell integrada (EIM).
- Interfaz de depuración y Serial Wire Viewer (SWV).
- Unidad de temporizador del sistema SysTick.
- Unidad de protección de memoria opcional (MPU).
- Múltiples interfaces de bus de alto rendimiento.

En la siguiente figura se muestra un diagrama a bloques de la estructura de un microcontrolador ARM Cortex-M4.



**Figura 21.** Diagrama de bloques de la estructura para un MCU ARM Cortex M-4.  
Fuente: (Bai, 2016)

### 2.2.3.3. Arquitectura de un MCU ARM Cortex-M4

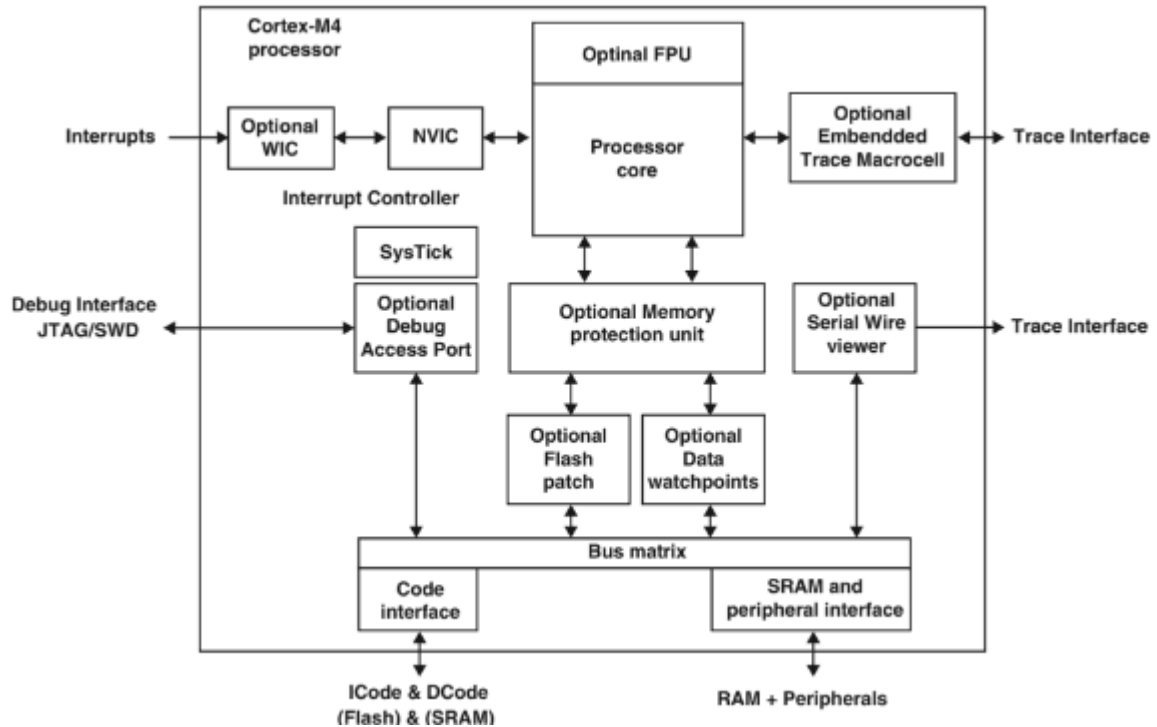
El núcleo Cortex-M4 o unidad de procesamiento central (CPU) es la responsable del control central para todo el MCU Cortex-M4. Todas las instrucciones se obtienen, decodifican y ejecutan dentro de esta CPU. (Bai, 2016) resalta que la CPU o procesador consta de tres componentes clave:

- Banco de registro.
- Ruta de datos interna.
- Unidad de control.

La unidad de punto flotante (FPU) es una de las diferencias importantes entre el MCU Cortex®-M4 y el MCU Cortex-M3, debido a que se agrega una unidad de punto flotante (FPU) opcional al núcleo Cortex®-M4 para mejorar las operaciones de datos de punto flotante. La FPU



Cortex®-M4 implementa arquitectura ARMv7E-M con extensiones FPv4-SP. Proporciona funcionalidad de cálculo de punto flotante que cumple con ANSI/IEEE Std 754-2008, estándar IEEE para aritmética binaria de punto flotante. En la siguiente figura se muestra un diagrama a bloques de la arquitectura de un MCU Cortex-M4.



**Figura 22.** Diagrama de bloques de la arquitectura de un MCU Cortex-M4.

Fuente: (Bai, 2016)

#### 2.2.3.4. Ventajas

En la actualidad, los procesadores ARM Cortex-M tienen muchas ventajas técnicas y no técnicas en comparación con otras arquitecturas. En seguida se enlistan algunas de las principales ventajas de esta arquitectura de acuerdo con (Yiu, 2014):

**Bajo consumo:** En comparación con otros diseños de procesadores de 32 bits, los procesadores Cortex-M son relativamente pequeños. Además, están optimizados para un bajo consumo de energía. Hoy en día, muchos microcontroladores Cortex-M tienen un consumo de energía de menos de 200  $\mu\text{A}/\text{MHz}$ , sin embargo, algunos se encuentran por debajo de los 100  $\mu\text{A}/\text{MHz}$ .

**Rendimiento:** Pueden ofrecer velocidades de procesamiento desde 1,25 DMIPS/MHz, lo que permite que los microcontroladores Cortex-M4 manejen muchas aplicaciones complejas y exigentes. Alternativamente, puede ejecutar la aplicación con una velocidad de reloj mucho más lenta para reducir el consumo de energía.

**Eficiencia energética:** Cortex-M4 tienen una excelente eficiencia energética. Por lo que puede realizar grandes niveles de procesamiento, con un suministro limitado de energía. Adicionalmente puede realizar tareas más rápido y permitir que el sistema permanezca en modo de suspensión durante más tiempo, lo que permite una mayor duración de la batería en productos portátiles.

**Escalabilidad:** La serie de procesadores Cortex-M permite escalar fácilmente diseños desde microcontroladores simples y de bajo costo que cuestan menos de un dólar hasta microcontroladores de gama alta que funcionan a 200 MHz o más.

**Compatibilidad:** Están diseñados considerando las aplicaciones del sistema operativo. Existen varias funciones disponibles para facilitar la implementación del sistema operativo y hacer que las operaciones del sistema operativo sean más eficientes. Actualmente hay más de 30 sistemas operativos integrados disponibles para los procesadores Cortex-M según (Yiu, 2014).

#### **2.2.3.5. Aplicaciones**

La serie de microcontroladores Cortex M4 son óptimos para una gran variedad de aplicaciones. A continuación, se describe gran parte de las posibles aplicaciones de acuerdo al criterio de (Yiu, 2014):

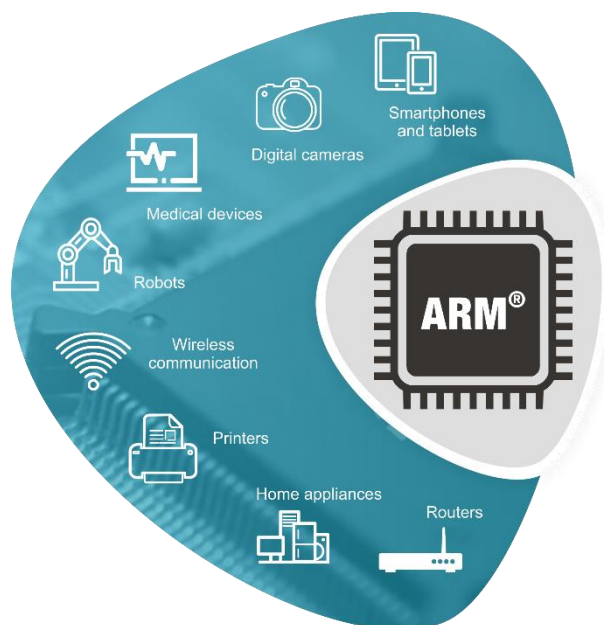
**Automotriz:** Los procesadores Cortex-M4 tienen gran importancia la industria automotriz. Debido a que ofrecen un gran rendimiento, una eficiencia energética muy alta y una latencia de interrupción baja, son ideales para muchos sistemas de control en tiempo real.

Además, la flexibilidad del diseño del procesador lo hace ideal para ASSP (productos estándar específicos de la aplicación) altamente integrados para la industria automotriz.

**Comunicación de datos:** Debido a la baja potencia y la alta eficiencia del procesador, junto con las instrucciones en Thumb-2 para la manipulación del campo de bits, hacen que los procesadores Cortex-M4 sean ideales para muchas aplicaciones de comunicación, como Bluetooth y ZigBee.

**Control industrial:** Debido a su simplicidad, respuesta rápida y la fiabilidad son factores clave para el control industrial. Las características de soporte de interrupciones en los procesadores Cortex-M4, incluidos su comportamiento determinista, el manejo automático de interrupciones anidadas, MPU y el manejo mejorado de fallas, por lo que son indispensables en esta área.

**Productos de consumo:** En gran variedad de productos de consumo, se utiliza uno o varios microprocesadores de alto rendimiento. Cortex-M4, al ser pequeños, son altamente eficientes y de bajo consumo, y al mismo tiempo brindan el rendimiento requerido para manejar interfaces complejas en paneles LCD y varios protocolos de comunicación.



**Figura 23.** Campos de aplicación de los microcontroladores ARM.

Fuente y colaboración: Mistral Solutions. Tecnologías ARM y su importancia

## 2.2.4. Plataforma Ophyra

Debido a la gran potencia y eficiencia de los microcontroladores ARM en el mundo, en el año 2009, el 90% de los procesadores de 32 bits son ARM. Por lo cual, actualmente existen diferentes plataformas que incorporan este tipo de microcontroladores.

Ophyra es una plataforma de desarrollo diseñada para proyectos electrónicos de alto desempeño. Es desarrollada y ensamblada por la empresa mexicana Intesc Electronics & Embedded. La tarjeta integra un núcleo de 32 bits ARM Cortex-M4 y utiliza el microcontrolador STM32F407VGT6 de STMicroelectronics, como principal unidad de procesamiento (Embedded, 2017).

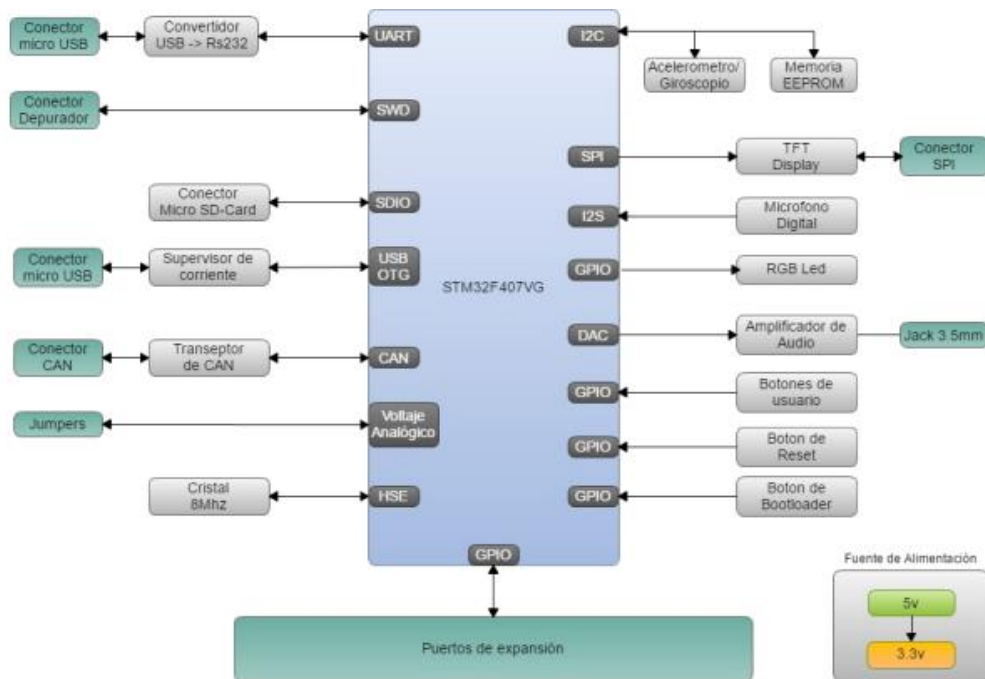
### 2.2.4.1. Características

Algunas de sus características principales son las siguientes:

- **Microcontrolador:** Incorpora un microcontrolador STM32F407VGT6/168Mhz. Tiene un empaquetado LQFP100, una unidad de punto flotante (FPU) y 192-Kbyte de memoria RAM.
- **Puerto COM virtual:** Interfaz de transferencia de datos USB.
- **Fuentes de alimentación:** La fuente principal es de 5V y la secundaria de 3.3V.
- **Acelerómetro + giroscopio:** MPU-6050, con una interfaz I2C, mientras que el acelerómetro es de 3 ejes.
- **Memoria EEPROM:** M24C32 con Interfaz I2C y hasta 4Kbyte de EEPROM.
- **Puerto USB-OTG-FS:** Puerto USB Full Speed 12Mbits/seg.
- **Pulsadores:** 4 pulsadores de propósito general, 1 de Reset y 1 más de Actualización de software (BOOT).
- **Puertos de expansión:** Cuenta con puertos para depuración, voltajes analógicos, salida de convertidor Digital/Analógico (DAC), puertos de E/S y de SPI.

- **Pantalla TFT:** Incorpora una pantalla de 128 \* 160 pixeles y se comunica mediante interfaz de comunicación SPI.

En la siguiente figura se muestra la representación en diagrama de bloques del sistema de la plataforma Ophyra.



**Figura 24.** Diagrama de bloques del sistema Ophyra.

Fuente: (Embedded, 2017)

## CAPITULO III. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PLC

Para comenzar el diseño y desarrollo del Controlador Lógico Programable, se tienen que examinar las diferentes características y especificaciones requeridas, alcanzando los objetivos previamente escritos. Este proyecto tiene la finalidad de diseñar e implementar un PLC basado en un microcontrolador ARM Cortex-M4 para la automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla, por lo que su diseño tiene un enfoque específico, sin embargo, el diseño debe cumplir con los requerimientos mínimos de un PLC. Antes de iniciar la descripción de este capítulo, se expondrán proyectos similares para tomar como referencia sus características y su diseño.

### 3.1. Proyectos de referencia

A continuación, se describirán dos proyectos cuyo objetivo es diseñar e implementar un Controlador Lógico Programable, teniendo como unidad principal de procesamiento un microcontrolador.

#### 3.1.1. PLC didáctico

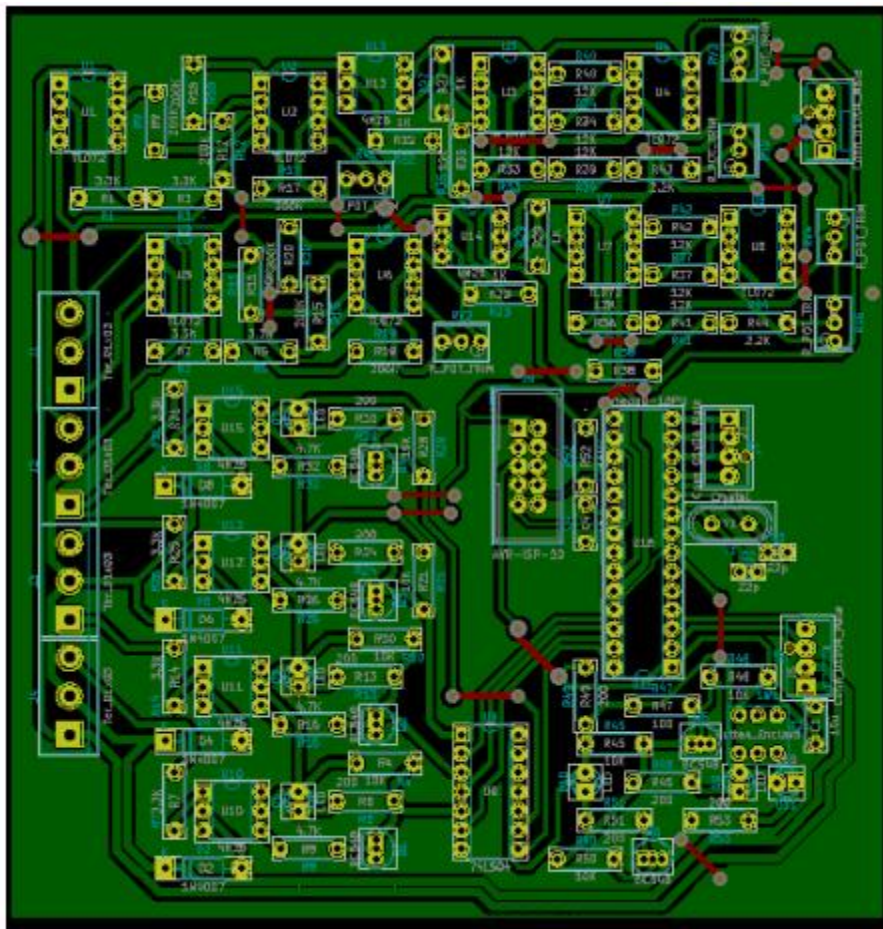
Es un proyecto que se realizó en México, específicamente en el estado de Veracruz y se desarrolló con el objetivo de diseñar un Controlador programable para implementarlo como equipo didáctico en beneficio de estudiantes de ingeniería. El dispositivo integra un microcontrolador ATmega8 de la compañía ATMEL. (Valencia, 2021)

En seguida se describirán algunas especificaciones generales de diseño de este proyecto:

- Botón de Reset y stop.
- LED de encendido, run y stop.
- Líneas de transmisión RX y TX para comunicación.
- Líneas de programación al microcontrolador.

- 4 líneas para leer las entradas digitales.
- 2 líneas para leer las entradas analógicas.
- 4 líneas para salidas digitales

El diseño del PCB de este proyecto fue desarrollado en el programa Kicad, el cual es un software de licencia libre. En la siguiente figura se muestra la PCB que fue desarrollada por (Valencia, 2021).



**Figura 25.** PCB del controlador programable didáctico.

Fuente: (Valencia, 2021)

Las características principales de diseño del PCB son que cada entrada analógica tiene su línea de común (GND), las cuatro entradas digitales deben estar conectadas a una sola línea de común (GND). Además de tener conectores tipo Jack de conexión para cable de alimentación

127 VAC, para una mejor para seguridad del usuario y también el usuario debe tener la opción de elegir que corriente manejaran los relevadores AC o DC. (Valencia, 2021)

### 3.1.2. PLC IoT

Este proyecto fue realizado la ciudad de Lima Perú con el objetivo de diseñar e implementar un PLC basado en Raspberry Pi & Nodered, el cual está enfocado en aplicaciones industriales IoT. La plataforma en la cual se basa el control del dispositivo integra un microcontrolador Quad Core 64-bit ARM-Cortex A72. Debido a que este proyecto estaba enfocado generalmente para aplicaciones industriales, el autor (León Callupe, 2021) adopto como referencia el estándar internacional IEC-611312. Las dimensiones del dispositivo son de 101x71x120mm, además tiene un peso ligero de 378 gr.

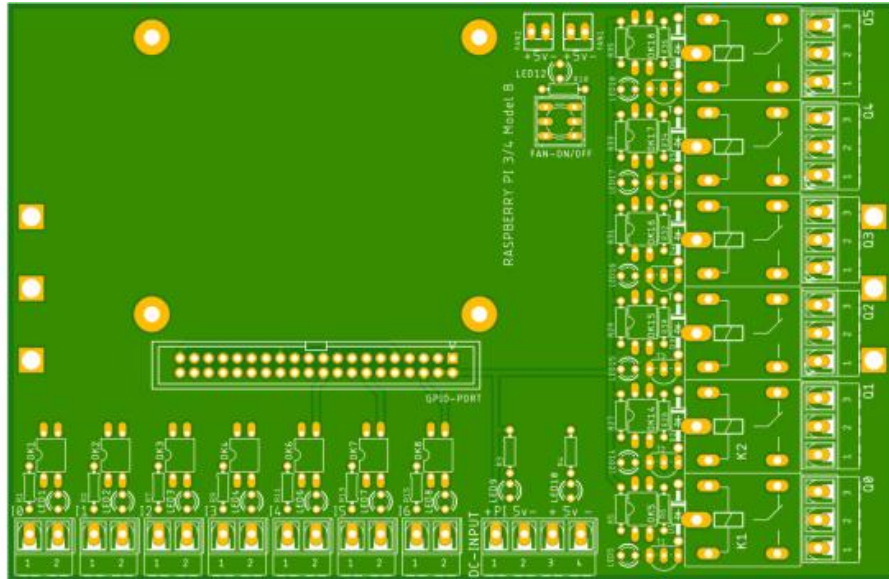
Algunas de las especificaciones generales de este proyecto son las siguientes:

- Sistema operativo Raspberry Pi OS.
- Alimentación de 5 VDC.
- Puertos USB 2.0.
- Puerto Ethernet.
- Conectividad Wifi.
- 7 entradas digitales optoacopladas.
- 6 salidas digitales optoacopladas de tipo relé.

En PCB fue diseñado en el software de Eagle Autodesk y se utilizó fibra de vidrio para su fabricación, con un espesor de 1.6mm. Dicha placa consta de dos caras, una que integra mascara anti-soldante y otra de metalizado para los pines de soldadura.

Cabe mencionar que en el diseño de PCB se emplearon polígonos o capas tanto de voltaje como de tierra o GND. Esto ayuda a que los circuitos electrónicos no tengas pérdidas de voltaje y no se generen interferencias de señales. En la figura 26 se observa el diseño de la PCB del PLC IoT.





**Figura 26.** Diseño de PCB del PLC IoT.

Fuente: (León Callupe, 2021)

Se observa que la PCB cuenta con un puerto, el cual es dedicado al puerto GPIO de la plataforma Raspberry Pi, mismo de donde derivan todas las señales de control del PLC. Por otro lado, se muestra que todos los componentes de la PCB son de tipo THT (Through-Hole Technology) o tecnología de agujero pasante. Esta tecnología es muy común cuando se diseñan circuitos electrónicos, debido a que el proceso de ensamble de componentes suele ser más habitual y sencillo.

### 3.1.3. Análisis

Para poder realizar el diseño y desarrollo del PLC, se tienen que tener en claro sus especificaciones mínimas requeridas, por tal motivo, en este apartado se realizará un breve análisis sobre los dos proyectos de referencia mencionados en los puntos anteriores. En la tabla 2 se describen las especificaciones generales y específicas de cada controlador, comparando cada una de sus características de funcionamiento. Cabe señalar que la aplicación de ambos es totalmente distinta, sin embargo, cumplen con los requerimientos de un PLC. Debido a que el PLC IoT tiene la finalidad de implementación en sistemas industriales cuenta con un

microcontrolador cuyo núcleo de procesamiento es más poderoso que el PLC didáctico, asimismo cuenta con mayor número de entradas y salidas. La ventaja del PLC didáctico es que cuenta con dos entradas analógicas, esto es de gran utilidad para la conexión de sensores cuyas señales son analógicas. Otra característica diferente se encuentra en el sistema eléctrico, dado que el PLC didáctico tiene una alimentación de 127 VAC y el otro de 5 VDC, además de que cuenta con una fuente externa de 24 VDC.

**Tabla 2.** Comparación de las diferentes características de proyectos de referencia.

<b>Tabla de comparación de PLC's</b>		
<b>Especificaciones generales</b>		
Modelo	-	PLC IoT
País de origen	México	Perú
Precio (USD)	-	\$217.20
Dimensiones	-	42x122x174.6mm
<b>Sistema electrónico</b>		
<b>Controlador</b>		
Plataforma	Arduino	Raspberry Pi 4
Microcontrolador	Atmel®AVR® AT Mega8	Quad core ARM-Cortex A72
No. De bits	8 bits	64 bits
Sistema operativo	Arduino OS	Raspberry Pi OS
<b>Especificaciones eléctricas</b>		
Alimentación	127 VAC	5 VDC
Consumo	-	15 W
Fuentes externas	Sí	No
<b>Entradas/Salidas</b>		
<b>Entradas digitales</b>		
No. De entradas digitales	4	7
Voltaje	24 VDC	24 VDC
Corriente	7 mA	-
<b>Entradas Analógicas</b>		
No. De entradas analógicas	2	No
Rango de voltaje	0 a 10 VDC	-
<b>Salidas digitales (relé)</b>		
No. De salidas digitales	4	6
Voltaje máx	220 VAC	250 VAC
Corriente	10 A	10 A

Fuente: Elaboración propia.

## 3.2. Especificaciones del PLC

La descripción de los proyectos de referencia en los puntos anteriores, da fundamento para poder definir las especificaciones mínimas de un PLC que tiene como unidad de procesamiento un microcontrolador.

### 3.2.1. Requerimientos generales

En seguida, se describirán las características y especificaciones más importantes que se necesitan para cumplir con el objetivo del diseño y desarrollo de un controlador programable basado en un microcontrolador ARM Cortex-M4 para automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla.

El primer requerimiento a tener en cuenta para el diseño es el tamaño del PCB, el cual debe ser pequeño, debido a que la dimensión de la placa repercute considerablemente en el precio de fabricación, además de que un micro PLC no es de gran tamaño. Sin embargo, las medidas resultantes del diseño de la PCB fueron de 170x120x1.64mm. Cabe señalar que el peso del dispositivo no una característica que limite el objetivo del proyecto, no obstante, se pretende que tenga un peso promedio entre los proyectos de referencia y los que ya existen en el mercado.

Actualmente, implementar controladores lógicos programables de marcas de prestigio dentro de la automatización industrial tiene un costo muy alto, por tal motivo se requiere que el diseño y la fabricación del PLC sea de un bajo costo, debido a que es uno de los objetivos principales que tiene este proyecto. Por ello, se tomará como referencia el precio del PLC IoT, el cual tuvo un costo de \$217.00 USD considerando que fue fabricado e implementado en el año 2021.

Sobre las especificaciones electrónicas y eléctricas se encuentra la alimentación. Por la aplicación que desarrollará el PLC se decidió tener una entrada de alimentación alterna, lo que permite al usuario aplicar un voltaje de hasta 240 VAC. Sin embargo, las señales de E/S serán de corriente continua, por lo que se implementaron dos fuentes conmutadas con una salida fija

de 12VDC y un consumo de 20W. Una fuente es la encargada de alimentar a las entradas y la otra a las salidas. Sin embargo, el controlador se alimenta con un VCC de 3.3V, por lo que se implementó un circuito regulador de voltaje con una entrada típica de 12VDC y una salida fija de 3.3 VDC.

Sobre las especificaciones del controlador del PLC, se implementó un microcontrolador ARM Cortex-M4, debido a que su velocidad de reloj es muy alta, además de que incorpora una arquitectura de 32 bits. El microcontrolador que se utilizó fue el modelo STM32F407 fabricado por la empresa STMicroelectronics. Además de que el microcontrolador utilizado permite cargar el sistema operativo (OS) de MicroPython. El chip de este modelo cuenta con tres tipos de empaquetado, lo que permite cumplir con las características necesarias para el desarrollo del PLC.

Con respecto a los módulos de entrada y salida del PLC, se cuenta con 14 entradas y 8 salidas digitales optoacopladas, donde las salidas son de tipo relé. No se cuenta con salidas ni entradas analógicas.

Referente a los puertos del PLC, se cuenta con un puerto Micro-USB tipo B para la programación del microcontrolador. Para la tarea que cumplirá el sistema no fue necesario la configuración de USB-OTG, sin embargo, se consideró realizar dicha configuración. El PLC dispone de un puerto de expansión de 16 pines, con alimentación a 3.3VDC que permitirán anexarle tarjetas de expansión diseñadas posteriormente. Para ello se utilizó el puerto A y el puerto B del microcontrolador, además el puerto cuenta con un segundo pin de alimentación de 12VDC. Para la transmisión de datos se tiene disponible un apartado de dos líneas directas como salida de comunicación serial (Rx-Tx).

Por otro lado, cada entrada y salida del PLC cuenta con un Led, el cual facilita de manera visual la programación y conexión de sensores y/o actuadores. Debido a que diseño del PLC dispone de un gran número de componentes se consideró la implementación de componentes electrónicos de superficie superficial (SMD), dado que suelen ser más pequeños y económicos.

Sin embargo, algunos componentes solo se encuentran disponibles en tecnología de agujero pasante (THT). En la tabla 3 se describen las especificaciones generales del PLC, como es el nombre, versión, país de procedencia, dimensiones y la empresa por la cual será ensamblado. La importancia de mencionar estas especificaciones es

**Tabla 3.** Especificaciones generales del PLC.

<b>Especificaciones Generales</b>	
Modelo	Micro PLC Board
Versión	v1.0
País de procedencia	México
Costo	\$ 198 USD
Dimensiones	170 x 120 x 1.64 mm
Peso	Por definir
Ensamblado por	Intesc Electronics & Embedded

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Especificaciones electrónicas

De manera general, las especificaciones electrónicas consisten en el tipo de controlador, las características principales de la fuente de alimentación, el número de puertos del PLC y las características generales de las entradas y salidas.

En la tabla 4 se definen las especificaciones electrónicas del PLC, se muestra que se utilizó un microcontrolador un ST32F407 fabricado por la compañía STMicroelectronics, el cual corresponde a la familia de microcontroladores ARM Cortex-M4 y tiene una arquitectura de 32 bits. Además de que este microcontrolador permite integrar un sistema operativo (OS), en este caso MicroPython.

Dentro de las especificaciones electrónicas de diseño del PLC se incorporan 14 entradas digitales, con aislamiento óptico, para recibir señales de 12 o 24 VDC, 8 salidas con relevadores independientes con los modos de operación normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC), un puerto de expansión de 16 pines. También el diseño del PLC ofrece una salida de voltaje de 12V a 20W, lo que permite conectar sensores industriales directamente a la placa.

**Tabla 4.** Especificaciones electrónicas del PLC.

<b>Sistema Electrónico</b>	
<b>Controlador</b>	
Microcontrolador	STM32F407VGT6
Velocidad (frecuencia de reloj)	168 MHz
Sistema Operativo	MicroPhyton
<b>Especificaciones Eléctricas</b>	
Alimentación	100-240 VAC
Consumo	20 Watts
Corriente máx.	0.8 A
<b>Puertos</b>	
<b>Puertos</b>	
USB Boot-Loader	1
Comunicación serial (Tx-Rx)	1
<b>Expansivo</b>	
Puerto de expansión para señales analógicas	1
<b>Entradas/Salidas</b>	
<b>Entradas</b>	
Entradas digitales optoacopladas	14
Voltaje de entrada	12 -24 VDC
<b>Salidas</b>	
Salidas optoacopladas de tipo (relé)	8
Voltaje salida a relé	240 VAC
Corriente salida a relé	10A

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3. Funcionamiento

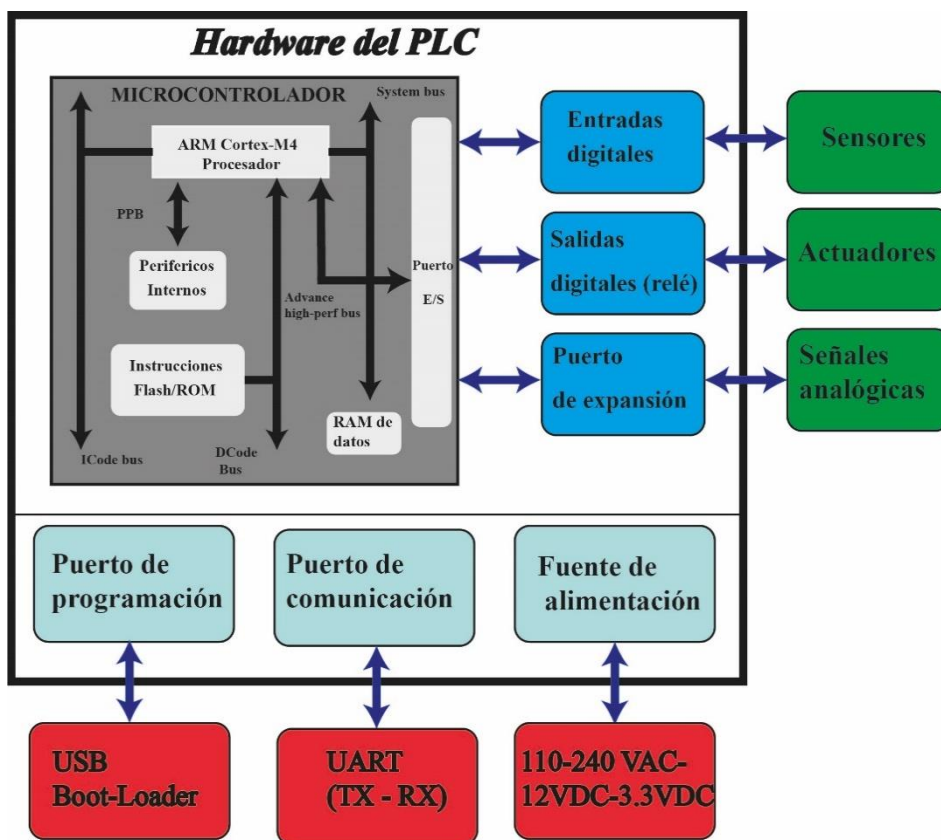
El diseño de este PLC tiene como Unidad Central de procesamiento un microcontrolador ARM Cortex-M4, el cual tiene una arquitectura Harvard de 32 bits. En especial este microcontrolador tiene la capacidad de ejecutar instrucciones de procesamiento digital de señales (DSP) y de punto flotante, lo que permite realizar operaciones lógicas complejas.

Los sensores y actuadores se comunican con los diferentes puertos GPIO del microcontrolador mediante módulos de entrada y salida, los cuales disponen de aislamiento óptico, lo que permite separar la etapa de control y la etapa de potencia. Cada entrada tiene la capacidad de recibir señales de 12 o 24VDC, además de tener una terminal de alimentación de 12VDC con 20W de potencia para conectar sensores industriales directamente desde la placa.

Mientras que las salidas a relevador pueden trabajar con voltajes de corriente directa a 24VDC o corriente alterna 127-240 VAC y están diseñadas para trabajar con contactores o arrancadores industriales que finalmente son los encargados de manejar cargas elevadas de corriente.

El hardware del PLC está conformado por la unidad central de procesamiento, el cual es un microcontrolador, módulos de entrada y salida para la conexión de sensores y actuadores, además se agregó un módulo de expansión el cual se piensa utilizar para señales analógicas. Asimismo, incorpora un puerto de programación, un puerto de comunicación serial RS-232 o RS-485 y la fuente de alimentación que va desde los 110-240 VAC hasta los 3.3VDC.

En la figura 27 se muestra un diagrama de bloques de las partes que conforman el hardware del PLC y del microcontrolador.

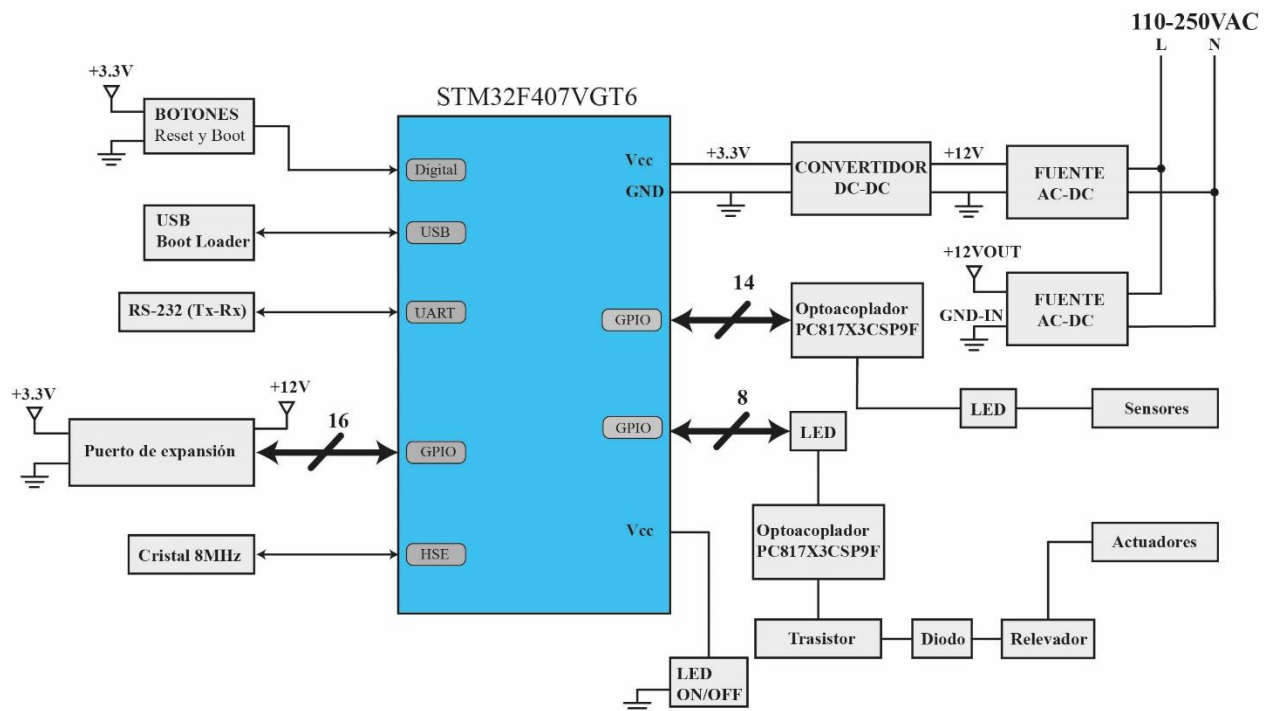


**Figura 27.** Diagrama a bloques del hardware del PLC.

Fuente: Elaboración propia.

El PCB cuenta con dos pulsadores de montaje superficial dedicados al sistema del microcontrolador, los cuales son el Boot y el Reset. El Boot tiene la función de forzar al microcontrolador para entrar en modo Bootloader, por lo que se tiene que mantener presionado durante un reinicio, mientras que el Reset únicamente reinicia el microcontrolador. Además, el sistema del microcontrolador cuenta con una fuente de reloj externa de alta velocidad (HSE), por lo que se implementó un cristal oscilador de superficie montada de 8 MHz para generar dicha señal de reloj externa.

En la figura 28 se muestra un diagrama de conexiones del PLC.



**Figura 28.** Diagrama de conexiones del PLC.

Fuente: Elaboración propia.



### 3.4. Desarrollo de hardware para el PLC

El hardware del PLC consta de una placa PCB donde se encuentran los circuitos electrónicos para su funcionamiento, entre ellos se encuentra el circuito de alimentación, los circuitos de los módulos de entrada y salida del PLC y puertos. En cada circuito se implementan distintos tipos de componentes electrónicos.


#### 3.4.1. Características de los componentes

La selección de los componentes electrónicos se realizó con base a los requerimientos del PLC. Por tal motivo se realizó un análisis de las diferentes características electrónicas, con la finalidad de cumplir con el objetivo principal de funcionamiento. En seguida se mostrarán las características de los componentes más destacados dentro del hardware del PLC. Además, se describen las razones más importantes de su implementación.

#### Microcontrolador

Se propuso utilizar un microcontrolador ARM Cortex-M4, implementando el modelo ST32F407 de la compañía STMicroelectronics uno de los fabricantes de semiconductores líderes de la industria. Este microcontrolador permite cargar un sistema operativo (OS), por lo que se utilizará OS-MicroPython que permite realizar la programación en lenguaje Python V3 de manera sencilla. Además de disponer de una alta velocidad de reloj y una arquitectura de 32 bits. Con respecto al costo del controlador tiene una buena relación en cuanto a calidad-precio, lo que hace que su precio sea justo. En la tabla 5 se muestran algunas de sus características generales y eléctricas.

**Tabla 5.** Características del microcontrolador.


Microcontrolador	Voltaje de operación	Velocidad (frecuencia de reloj)	Datos principales	Interfaces de comunicación	Tipo de empaquetado	Imagen
<b>STM32F407 ARM-Cortex M4</b>	1.8 - 3.6 VDC	168 MHz	88 pines de E/S digital 24 canales de conversión A/D 2 salidas de conversión D/A Salidas PWM	3 seriales USART 3 SPI 3 I2C 2 CAN-BUS	LQFP100	

Fuente: Elaboración propia.

## Optoacoplador

Para poder realizar el aislamiento óptico entre la etapa de control y la etapa de potencia se utilizó un optoacoplador de superficie montada (SMD) modelo PC817X3CSP9F de la empresa Sharp Electronics. Este modelo contiene un diodo IRED o infrarrojo acoplado ópticamente a un fototransistor NPN, el voltaje de aislamiento de entrada-salida es de 5,0 kV, también ofrece un alto voltaje colector-emisor de hasta 80V. Se seleccionó este modelo en particular debido a que su diseño está dedicado al aislamiento de entradas-salidas de microcontroladores y permite la transmisión de señales entre circuitos de diferentes potenciales e impedancias. En la tabla 6 se muestran algunas de sus características generales y eléctricas.

**Tabla 6.** Características del Optoacoplador.


Optoacoplador	Voltaje de entrada	Voltaje de salida colector-emisor	Voltaje de salida emisor-colector	Temperatura de operación	Tipo de empaquetado	Imagen
<b>PC817X3CSP9F</b>	1.2-3.0 VDC	80 VDC	6 VDC	-30°C~+100°C	4-SMD	

Fuente: Elaboración propia.

## Transistor

El diseño requiere de un transistor NPN, de manera que se utilizó un transistor de superficie montada (SMD) modelo MMBT3904LT1G, con motivo de que cumple con los requerimientos y características eléctricas para poder cumplir su tarea. Además de que se emplea para aplicaciones automotrices y otras que requieren requisitos únicos de sitio y cambio de control, lo que hace que sea un dispositivo de interrupción fiable, además de ser pequeño y económico. En la tabla 7 se muestran algunas de sus características generales y eléctricas.

**Tabla 7.** Características del transistor.


Transistor	Voltaje colector-emisor	Voltaje colector-base	Voltaje emisor-base	Corriente máx. Colector	Tipo de empaquetado	Imagen
<b>MMBT3904LT1G</b>	40 VDC	60 VDC	6 VDC	900 mA	SOT-23	

Fuente: Elaboración propia.

## Relevador

Las salidas digitales del PLC requieren de la implementación de relevadores para el control de actuadores como contactores o arrancadores industriales, por tal motivo deben resistir cargas elevadas de corriente. Se utilizaron relevadores de 5 pines modelo SRD-12VDC-SL-C, dado que tiene la capacidad soportar hasta 250 VAC y una corriente de carga máxima de 10 A. El costo de este modelo es bajo si se compara con otros, además tiene un tamaño ideal para ser usado en placas PCB. En la tabla 8 se describen algunas de sus características eléctricas.

**Tabla 8.** Características eléctricas del relevador.

Relevador	Voltaje de la bobina	Corriente de la bobina	Voltaje de conmutación	Corriente de carga máx.	Temperatura de operación	Imagen
SRD-12VDC-SL-C	12 VDC	30 mA	250 VAC máx	10 A	-40°C~+85°C	

Fuente: Elaboración propia.

## Fuente de alimentación conmutada

Para alimentar al PLC se utilizaron dos fuentes independientes de 12 VDC a 20W. El modelo que se implementó es el HLK20M1 y consiste en un pequeño módulo de fuente de alimentación integrado encapsulado en un plástico diseñado por Hi-Link Technology Group. Se utilizó este módulo porque tiene la ventaja de bajo consumo de energía, alta eficiencia, aislamiento de alta seguridad y un voltaje de entrada universal de 100-250 VAC y una salida de 12 VDC. Cuenta con protección contra corriente en la salida y dispone de una ondulación baja y ruido reducido. En la tabla 9 se muestran algunas de sus características eléctricas.

**Tabla 9.** Características eléctricas del módulo de fuente de alimentación.


Fuente de alimentación conmutada	Voltaje nominal de entrada	Corriente máx. de entrada	Voltaje de salida	Potencia de salida	Temperatura de operación	Imagen
HLK-20M12	100-240 VAC	0.6 A	12 VDC	20 W	-25°C~+60°C	

Fuente: Elaboración propia.

## Regulador de voltaje

El rango de voltaje del microcontrolador es de 1.8 a 3.6V, sin embargo, el voltaje recomendado por el fabricante es de 3.3V. Por tal motivo fue necesario hacer uso de un regulador de voltaje de 12V a 3.3V y para lograrlo se utilizó el modelo LM2596SX-3.3/NOPB diseñado por Texas Instruments. Este componente es un circuito integrado de 5 pines y se encuentra disponible en superficie montada (SMD). Además de que brinda todas las funciones activas para un regulador de conmutación reductor, capaz de impulsar cargas con excelente regulación de línea. Uno de los motivos de su implementación es que requiere de un número mínimo de componentes externos para su funcionamiento y también porque es de bajo costo. En la tabla 10 se describen algunas de sus características eléctricas.

**Tabla 10.** Características eléctricas del regulador reductor de voltaje.

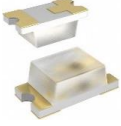
Regulador de voltaje reductor de 12V a 3.3V	Voltaje de alimentación máx.	Voltaje típico de salida	Eficiencia	Temperatura de operación	Tipo de empaquetado	Imagen
LM2596SX-3.3/NOPB	45 VDC	3.3 VDC	73%	-40°C~+125°C	TO-263	

Fuente: Elaboración propia.

## Indicadores (LED)

Para poder visualizar el estado de cada una de las entradas y salidas del PLC se integró un Led de superficie montada (SMD) modelo GBGM-C191TGKT-5A. Este componente tiene un empaquetado de 0603 pulgadas (in) y el motivo de su implementación fue que tiene un tamaño pequeño y un peso ligero. También cumple con las características eléctricas y lumínicas requeridas para cumplir con su función. Dispone de un rango de voltaje de operación de 2.8 - 3.6V y una corriente máxima de 100 mA. Además, tiene un ángulo de iluminación de 130° y una baja disipación de potencia. En la tabla 11 se muestran algunas de sus características generales y eléctricas.

**Tabla 11.** Características generales y eléctricas de los Leds.


LED	Voltaje de operación	Corriente máx	Intensidad luminosa	Ángulo de visión	Disipación de potencia	Imagen
GBGM-C191TGKT-5A	2.8-3.6 V	100 mA	71-450 mdc	130°	76 mW	

Fuente: Elaboración propia.

### Terminales de conexión (borneras)

Los módulos de entradas y salidas del PLC requieren de terminales para la conexión de sensores y actuadores, por lo que se implementaron conectores de bloque de tornillo de dos y tres terminales. Es importante considerar el cableado para los módulos de entrada y salida, dado que el estándar para conexiones industriales es de cable Awg #14 y para cargas más elevadas como de alimentación es de Awg #18. La ventaja de estos conectores, es que permiten realizar cableados de hasta Awg #22, resisten altas temperaturas y elevadas cargas de corriente. Todos los bloques se suministran con tornillos abiertos lo que acorta el tiempo de conexión. Estos conectores son ampliamente utilizados en controles industriales, equipos y controles de ventilación, calefacción y sistemas de seguridad industrial. En la tabla 12 se muestran las características principales de las terminales a utilizar.

**Tabla 12.** Características de las terminales de conexión.

Terminales de conexión	Voltaje máx	Corriente máx.	Paso	Cable	Tipo	Imagen
Clemax-Genérico	300 V	10 A	5.08 mm	22-18 Awg	Wire Protector	


Fuente: Elaboración propia.

### Resistencias

Todas las resistencias implementadas en la placa PCB son de superficie montada (SMD) y tiene un empaquetado 0603 pulgadas (in), sin embargo, se utilizaron resistencias de diferentes valores en base a los requerimientos de cada circuito. La razón por la cual se usó este modelo de resistencia en particular es que su rango de valor resistivo es de  $1\Omega$ - $10M\Omega$  y al mismo tiempo disponen de un rango de potencia de  $1/32W$  –  $1W$ . Las resistencias utilizadas, en su mayoría

son de 1/10 de Watt, debido a que la carga de corriente que se utiliza es muy baja. No obstante, para las salidas se utilizarán resistencias de 1/4 de Watt para poder soportar cargas de corriente más elevadas. Además de que son componentes de un tamaño pequeño y bajo peso. En la tabla 13 se muestran algunas de sus características eléctricas.

**Tabla 13.** Características eléctricas de las resistencias.

Resistencia	Rango de Watts	Tolerancia	Temperatura de operación típica	Rango de valor resistivo	Tipo de componente	Tamaño de la resistencia (in)	Imagen
0603WAFXXXXT5E	1/35W- 1W	±1%	-55°C~+70°C	1Ω-10MΩ	SMD	0603	

Fuente: Elaboración propia.

### Capacitores cerámicos

Los capacitores cerámicos en su totalidad son de superficie montada (SMD) y al igual que las resistencias tiene un empaquetado de 0603 pulgadas (in). El modelo que se usó tiene un rango de valores capacitivos muy amplio, además de que su precio es bajo. En la tabla 14 se muestran algunas de sus características eléctricas. Cabe mencionar que en la matricula del modelo las letras X corresponden a los distintos valores y tolerancias del capacitor, en vista de que en cada circuito se empleó un valor de capacitancia distinto.

**Tabla 14.** Características eléctricas de los capacitores cerámicos.

Capacitor	Voltaje nominal	Rango de tolerancia	Temperatura de operación	Rango de valor capacitivo	Tipo de componente	Tamaño de la resistencia (in)	Imagen
CL10XXXXXX8NNNC	10 VDC-50VDC	±5%-±10%	-55°C~+125°C	680pF-5.6nF	SMD	0603	


Fuente: Elaboración propia.

### Diodo

Con respecto a la protección del módulo de salida se utilizó un diodo de superficie montada (SMD) modelo 1N5819HW-7-F. El dispositivo es un diodo rectificador que ofrece una excelente estabilidad en altas temperaturas, además de tener alta capacidad de sobretensión, baja pérdida de potencia y una alta capacidad de corriente. Es utilizado en aplicaciones

industriales, automotrices o que requieran de un control de cambio específico. En la tabla 15 se observan algunas de sus características eléctricas.

**Tabla 15.** Características eléctricas del diodo (módulo de salidas).

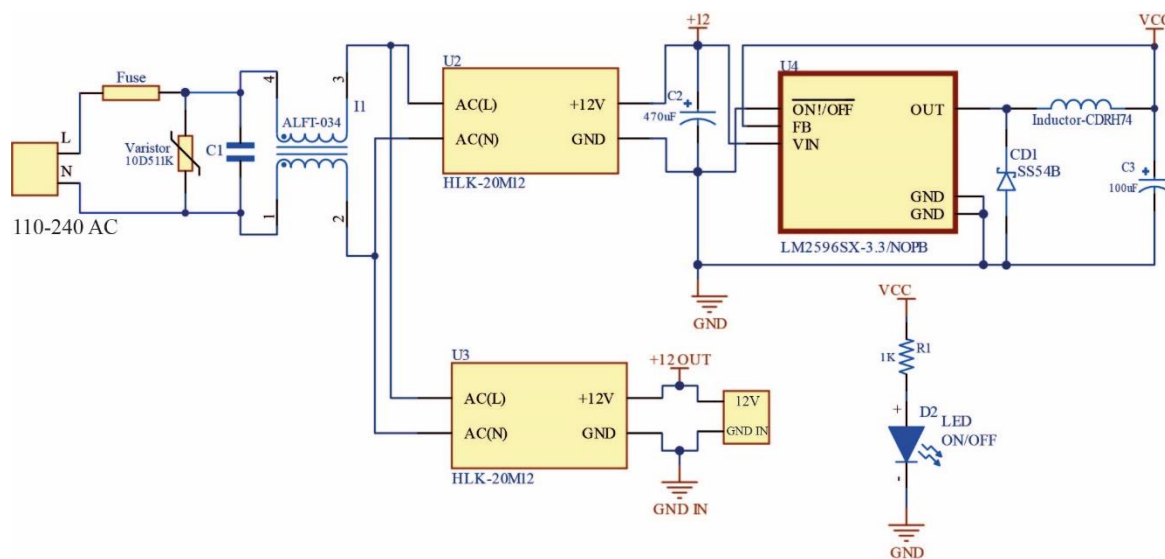
Diodo	Voltaje de ruptura inversa	Corriente de salida rectificadora promedio	Voltaje directo máx.	Temperatura de operación	Tipo de empaquetado	Imagen
1N5819HW-7-F	40 VDC	1.0 A	450 mV	-65°C~+125°C	SOD-123	

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2. Alimentación del PLC

El PLC es alimentado por dos fuentes conmutadas independientes, con una tensión de 12VDC y una potencia de 20W. Cada fuente corresponde a un módulo compacto integrado encapsulado en un plástico protector que permite conectarse directamente a cargas alternas, con un rango de voltaje de 100 a 240 VAC. Además de que las fuentes cuentan con protección por sobre corriente y corto circuito; en la entrada de ambas fuentes se implementó un circuito de protección a fusible, el cual tiene la finalidad de proteger a las fuentes contra corto circuitos. Cuenta con un circuito filtro de capacitor-transformador Shunt que permite proteger al circuito de transientes o armónicos de voltaje y por último se implementó un varistor que protege de sobre picos de voltaje. Para lograr este filtro, se utilizó un capacitor de poliéster de 250 VAC, el cual tiene un paso de 7.5 mm, además se utilizó una bobina de choque común modelo ALFT-034 para lograr la configuración del filtrado Shunt. Cabe mencionar que una de las fuentes es utilizada para alimentar el microcontrolador y los relevadores. El microcontrolador cuenta con su propia fuente DC-DC conmutada de 3.3VDC. Esta fuente toma alimentación de la fuente principal de 12VDC mencionada anteriormente. La segunda fuente está destinada como fuente de alimentación integrada al PLC. Esta fuente permitirá al usuario alimentar directamente los sensores industriales que se conecten a la placa, a través de una terminal de conexión de tornillos.

La fuente del microcontrolador consta de un circuito regulador reductor de voltaje de 12VDC a 3.3VDC de cinco pines. A la salida del voltaje de 12VDC de la fuente conmutada se encuentra un capacitor electrolítico de 470uF en paralelo con los pines de ON/OFF y VIN del circuito integrado. Un tercer pin FB tiene la finalidad de detectar el voltaje de salida regulado para complementar el circuito de retroalimentación. Dos de los pines del circuito integrado van conectados a GND y un último pin VOUT proporciona el voltaje de salida. Los reguladores reductores requieren un diodo para proporcionar un camino de retorno para la corriente del inductor cuando el interruptor se apaga, por tal motivo se implementó un diodo rectificador de barrera modelo SS54B. El regulador se encuentra en modo continuo, de manera que se implementó un inductor modelo CDRH74, sin embargo, para determinar su valor, el fabricante recomienda utilizar una inductancia de 68uH para un voltaje de entrada de 12VDC. Asimismo, se requiere un capacitor de salida para filtrar la salida y brindar estabilidad al lazo del regulador, la recomendación del fabricante es utilizar capacitores de tantalio sólido o electrolíticos de baja impedancia, de manera que se implementó un capacitor electrolítico de 100uF. En la figura 29 se puede observar el diagrama de conexión de entrada del PLC, el cual se realizó en el software de Altium Designer. Se observa que cuenta con un Led para indicar el estado del PLC (ON/OFF).



**Figura 29.** Diagrama esquemático de la fuente de alimentación.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.



### 3.4.3. Entradas del PLC

En la figura 30 se muestra el diagrama esquemático del circuito de entrada realizado en el software de Altium Designer. El circuito de entrada al optoacoplador PC81713NIP0X consiste en una resistencia R4 en serie con el led indicador del estado D3. El circuito de entrada está diseñado para trabajar con 12 y 24VDC, por tal motivo la resistencia R4 tiene un valor de 4.7 k $\Omega$  y se encarga de limitar la corriente que circula por el circuito. El circuito de salida del optoacoplador consiste en una resistencia en serie al transistor interno de un valor de 330 $\Omega$ . La salida se conecta de la terminal del colector (4) hacia la terminal digital del microcontrolador. Esta configuración se diseñó como una lógica negada, de manera que ante la presencia de 12 o 24VDC en la entrada, el PLC detectará un estado de lógico cero. Todas las entradas comparten un nodo común o GND-IN, sin embargo, este nodo se encuentra aislado del nodo común del microcontrolador y demás electrónica. El nodo GND-IN se ofrece como una terminal de tonillo, esto permite que el usuario pueda utilizar una fuente externa para alimentar las salidas.

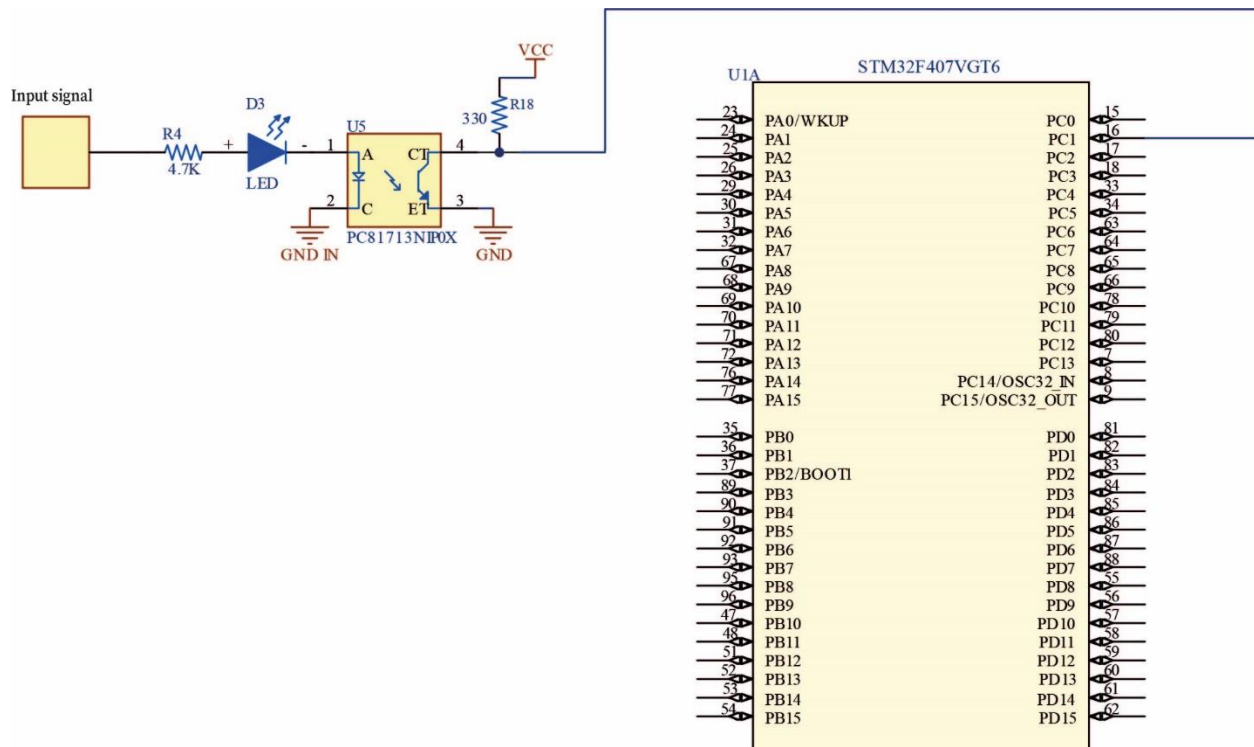


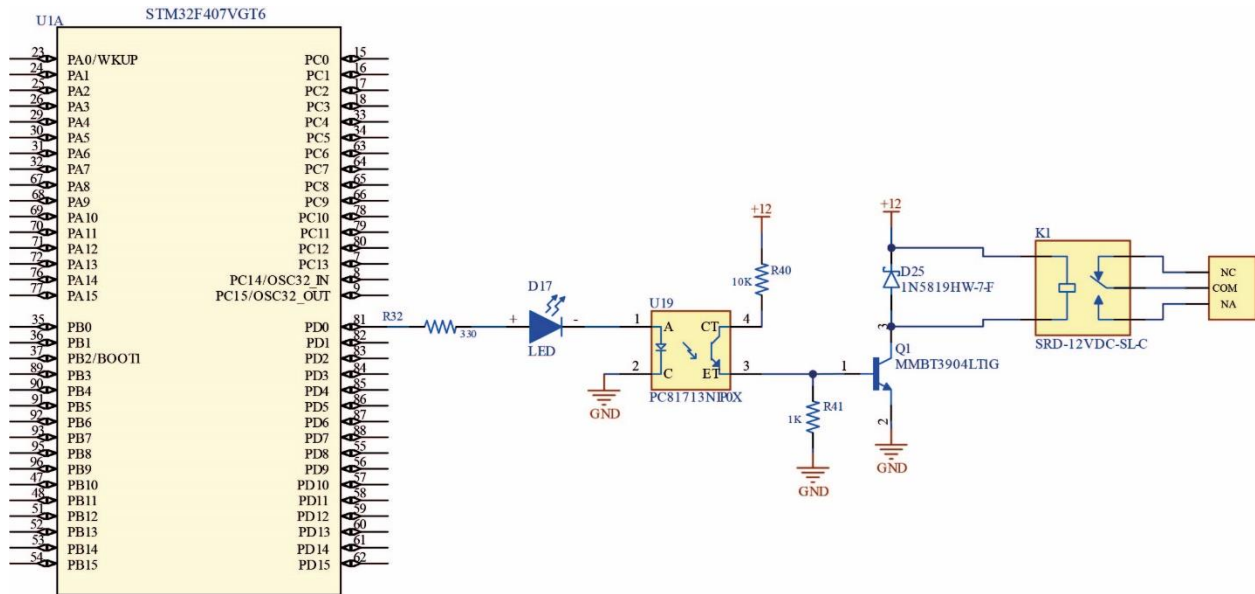
Figura 30. Diagrama esquemático del circuito de entrada.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

Cabe mencionar que las catorce entradas digitales optoacopladas del PLC se encuentran conectadas al puerto C del microcontrolador, las cuales van desde el pin PC0 hasta el PC14, el pin PC7 es de propósito específico, por tal motivo se descartó su uso.

#### 3.4.4. Salidas del PLC

En la figura 31 se muestra el diagrama esquemático del circuito de salidas realizado en el software de Altium Designer. Los módulos de salidas digitales son de tipo relevador, por lo que requiere de aislamiento óptico entre el microcontrolador y los elementos de potencia. Para la conexión de las salidas con el microcontrolador se utilizó parte del puerto D, desde el pin PD0 hasta el PD7. El circuito consiste en la conexión un pin del microcontrolador al que se le conecta una resistencia de  $330\Omega$  en serie con un led indicador D17, el uso de la resistencia es para limitar la corriente del microcontrolador, el led indicador va conectado directamente al ánodo del led interno del optoacoplador PC81713NIPOX. El circuito de salida del optoacoplador utiliza una fuente de 12 VDC y consiste en una resistencia R40 con un valor de  $10\text{ k}\Omega$ , la terminal del emisor (3) se conecta una resistencia R41 con un valor de  $1\text{ k}\Omega$  a la base de un transistor externo (Q1) MMBT3904LT1G con una configuración pull-down, operando en modo interruptor. El circuito colector-emisor de Q1 es un circuito serie de la fuente de 12 VDC y un diodo D25 conectado en forma inversa para protección de Q1 durante el proceso de conmutación. Así mismo el diodo D25 se conecta en paralelo a la bobina del relevador K1. Esta configuración permite tener una lógica inversa a la que se tiene en las entradas, de modo que, en la presencia de voltaje en la salida, el PLC detectará un estado lógico de uno. La terminal común de cada relevador es independiente, esta característica hace las salidas más versátiles, porque permiten que el usuario pueda conectar diferentes cargas de voltaje a cada salida.

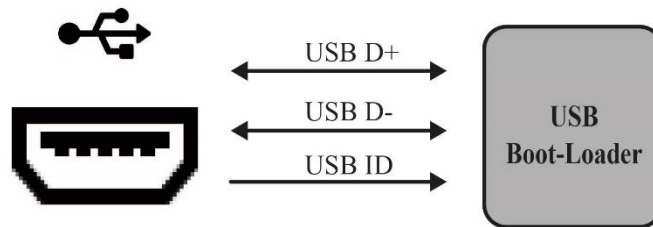


**Figura 31.** Diagrama esquemático del circuito de salida.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

### 3.4.5. Puerto de programación del PLC.

La programación del microcontrolador se realiza mediante un puerto micro USB de tipo B. La alimentación que se suministra a este puerto será detectada por el pin USB\_Vbus. El puerto se configuró como OTG (One-The-Go) es una extensión de USB 2.0 que permite a los dispositivos con puertos USB más flexibilidad e intercambiar las funciones maestro/dispositivo. El pin USB\_ID se incorpora para realizar la identificación del rol que se está ejecutando en cualquier momento. Para el intercambio de información se cuentan con los pines de las señales de datos identificados como USB\_D+ y USB\_D-. En la figura 32 se muestra un diagrama de conexión del módulo de potencia del puerto.



**Figura 32.** Diagrama del módulo de potencia del puerto USB.

Fuente: Elaboración propia.

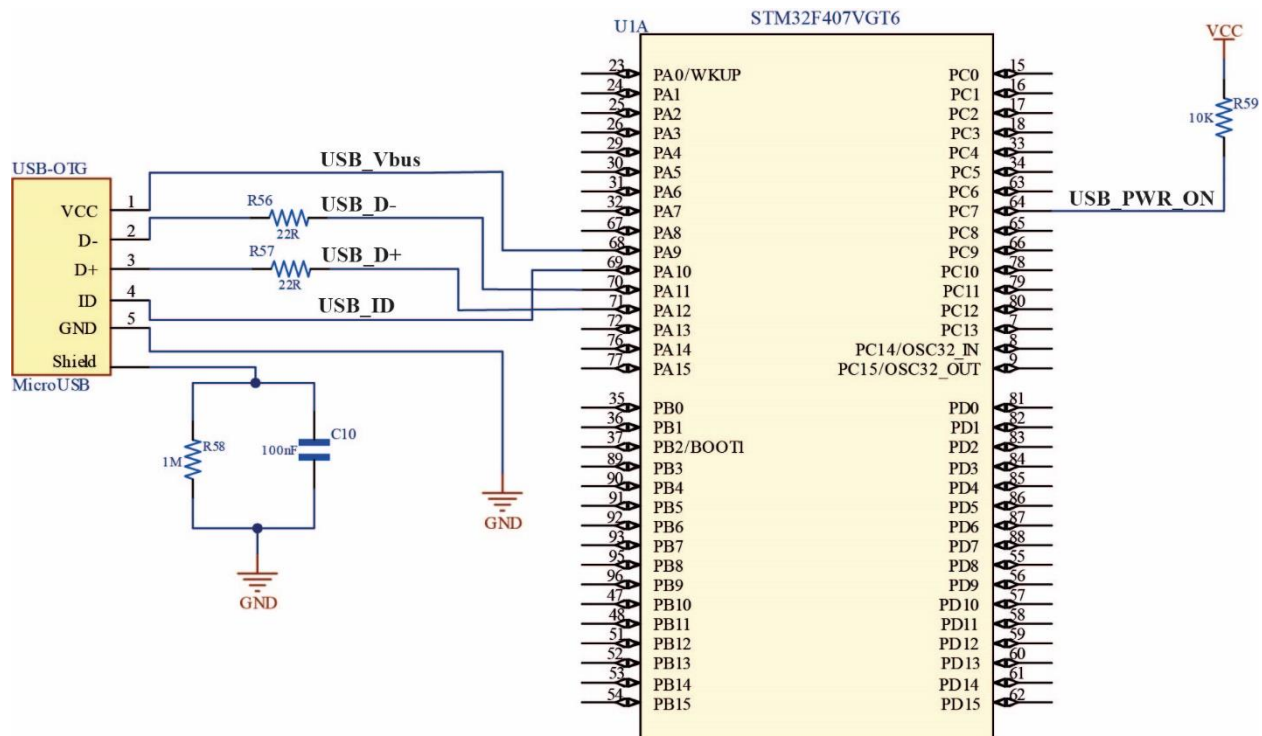
Es necesario conocer la función que cumple cada uno de los pines de conexión del puerto de programación USB. En la tabla 16 se muestra la función de cada pin del puerto USB, donde se utilizó la hoja de datos del microcontrolador para analizar sus características y el pin del microcontrolador que le corresponde.

**Tabla 16.** Descripción de los pines del puerto de programación USB.

Puerto de programación		
Nombre	GPIO	Función
USB_PWR_ON	PC7	Habilita la energía del puerto USB
USB_OverCurrent	PA8	Detecta si el consumo es mayor a 500mA
USB_Vbus	PA9	Identifica el voltaje en el puerto USB
USB_ID	PA10	Identifica el rol del dispositivo
USB_D-	PA11	Señal negativa de datos
USB_D+	PA12	Señal positiva de datos

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 33 se muestra el diagrama esquemático de la conexión del puerto USB para la programación del PLC.



**Figura 33.** Diagrama esquemático del puerto de programación USB.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

### 3.4.6. Cristal externo y alimentación del microcontrolador

El microcontrolador requiere el uso de un reloj externo de alta velocidad (HSE), por lo que se implementó un cristal de 8 MHz de superficie montada para la generar señales de reloj externas. El fabricante del microcontrolador recomienda colocar dos capacitores en paralelo de un rango de valores de 5 a 25pF. En la figura 34 se puede observar el diagrama esquemático del cristal.

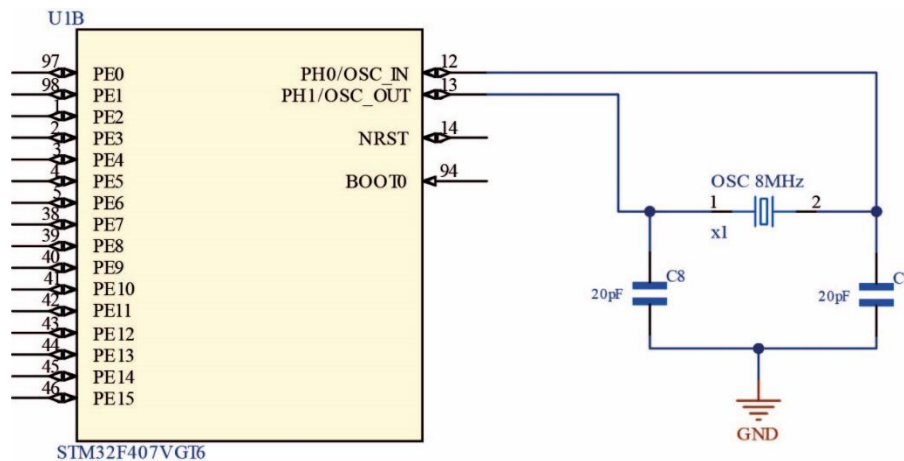


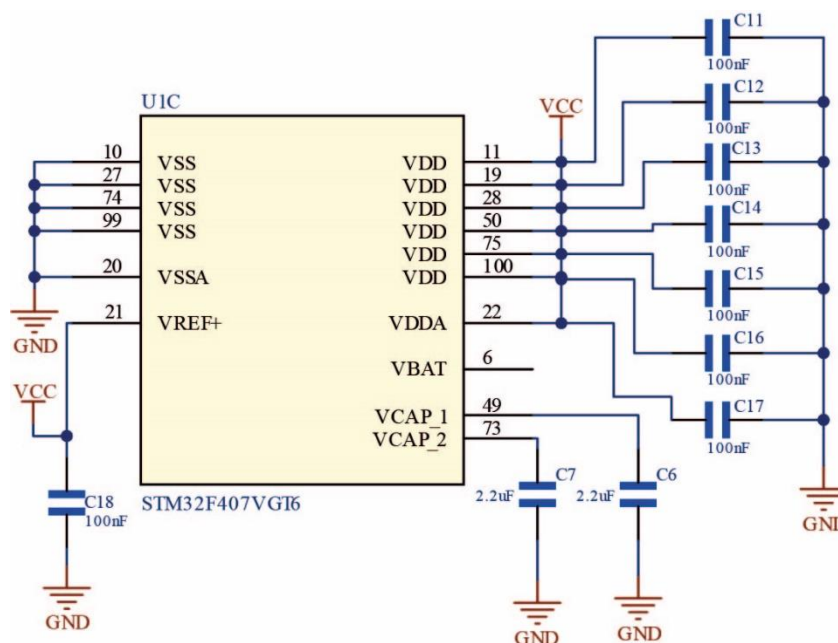
Figura 34. Diagrama esquemático del cristal externo.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

El microcontrolador cuenta con tecnología CMOS, por tal motivo sus pines de alimentación corresponden a VDD (Voltage Drain Drain) y VSS (Voltage Source Source). El VDD corresponde al voltaje de trabajo del chip, mientras que VSS es el punto de conexión a tierra. Los pines VDD y VSS se distribuyen uniformemente alrededor del chip, en consideración de la integridad de la energía, puede proporcionar al chip una mejor calidad de energía, reducir la impedancia de energía y asegurar circuitos digitales de alta velocidad. Para cada pin de alimentación VSS se colocó un capacitor de 100nF después del suministro de energía VCC.

Por otro lado, El fabricante del microcontrolador recomienda utilizar dos capacitores con un valor de 2.2uF en los pines VCAP\_1 y VCAP\_2. Son necesarios para mantener un voltaje interno estable, específicamente durante transitorios de voltaje causador por salidas de alta corriente, ráfagas de reloj o cambio de reloj interno a externo.

En la figura 35 se muestra el diagrama esquemático de la alimentación del microcontrolador.



**Figura 35.** Diagrama esquemático de la alimentación del microcontrolador.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

### 3.4.7. Pulsadores de propósito específico

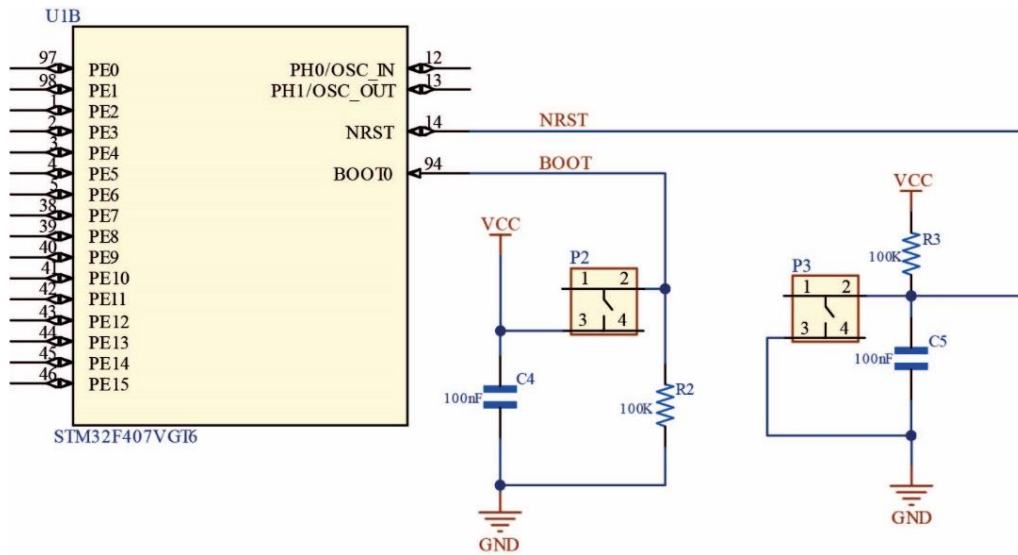
El diseño del PLC cuenta con dos pulsadores de propósito específico del sistema, los cuales son el RESET Y BOOT. Los pulsadores son de superficie montada y están conectados a pines específicos del microcontrolador. En la tabla 17 se muestra la descripción de los pulsadores, sus pines y su función.

**Tabla 17.** Características de los pulsadores de propósito específico.

Pulsadores del sistema		
Nombre	GPIO	Función
RESET	NRST	Reinicia el microcontrolador
BOOT	BOOT0	Forza al microcontrolador para entrar en modo Bootloader; si se mantiene presionado durante un reinicio.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 36 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones de los pulsadores del sistema.



**Figura 36.** Diagrama esquemático de los pulsadores de propósito específico.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

### 3.4.8. Diseño de la PCB

El diseño de la placa PCB del PLC se realizó en Altium Designer, debido a que es una plataforma de integración de software que reúne todas las herramientas necesarias para crear un entorno completo para el desarrollo de productos electrónicos en una sola aplicación. Altium Designer incorpora todas las herramientas necesarias para cumplir con el trabajo de diseño, tales como; desarrollo de diseño esquemático, simulación de circuitos, análisis de integridad de señales, diseño de placas PCB y diseño de sistemas embebidos. Antes de comenzar con la parte del diseño de la PCB es conveniente mencionar algunas características de Altium Designer.

- Brinda una extensa variedad de herramientas de gestión de datos y recursos de información, lo que permite al diseñador manejar un control sobre el uso de partes.
- Permite gestionar la generación y comprobación de toda la información de fabricación, ahorrando tiempo y costos, además de eliminar los errores de diseño.
- Ofrece una buena administración de proyectos y una infraestructura unificada de documentos.
- Genera productos con altos estándares de calidad, de acuerdo a reglas de diseño reconocidas.

Para comenzar con el diseño del PCB, se generó un nuevo proyecto en el cual se incluyeron los documentos esquemáticos y de PCB. En la tabla 18 se muestran todos los componentes utilizados en el diseño electrónico del PCB y una pequeña descripción.

**Tabla 18.** Tabla de componentes utilizados en el diseño del PCB.

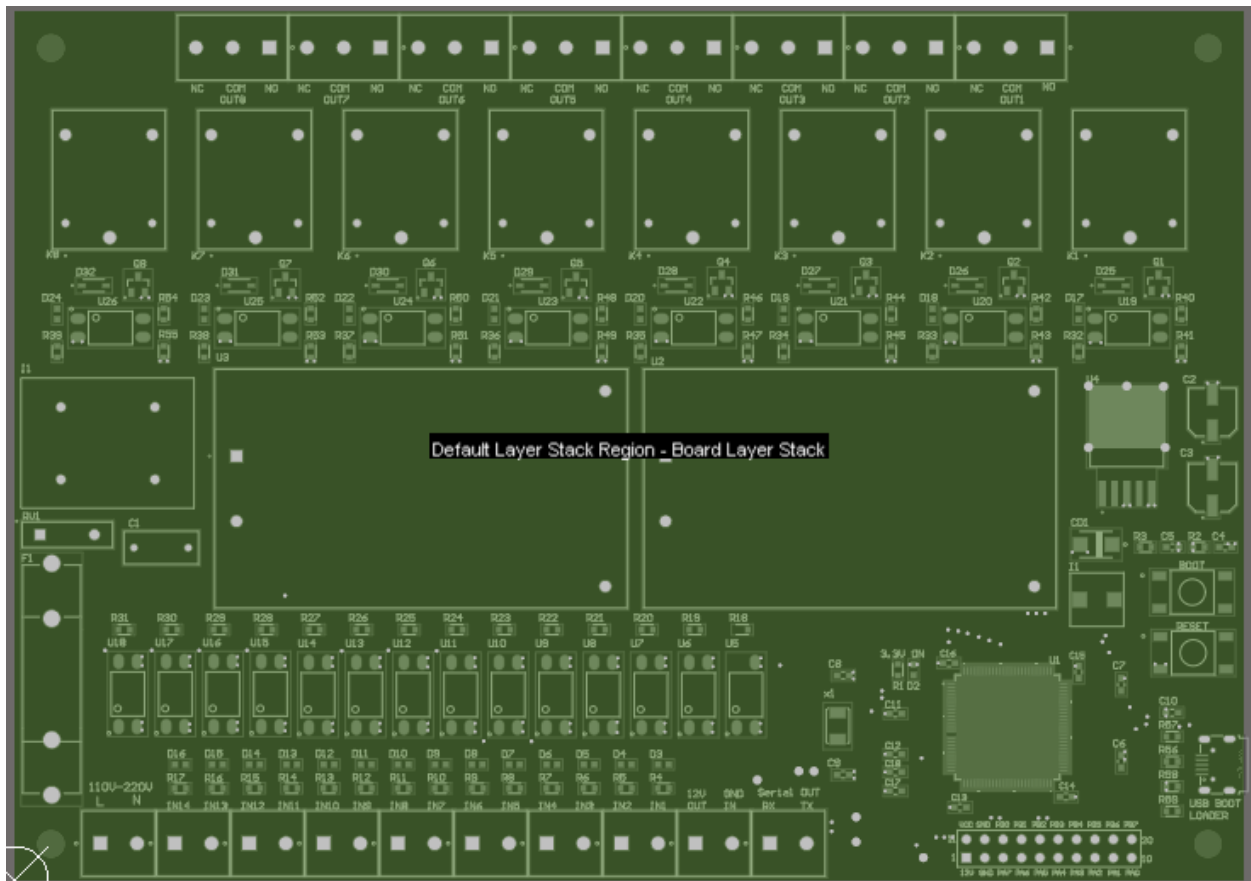
<b>Componente</b>	
<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
Capacitor 470uF	Capacitor electrolítico SMD de 470uF/16V
Capacitor 100uF	Capacitor electrolítico SMD de 100uF/16V
Capacitor 250VAC	Capacitor de poliester THT de 7.5mm de paso
Capacitores 100nF, 2.2uF, 20pF	Capacitores cerámicos SMD 0603
Diodo Schottky	Diodo SMD de 40V/1A modelo 1N5819HW-7-F con empaquetado SOD-123
Diodo Schottky	Diodo SMD de 40V/5A modelo SS54B con empaquetado DO-214AA
Led	Led SMD 0603 modelo GBGM-C191TGKT-5A
Fusible tipo americano	Fusible tipo americano modelo FUHOL6X30
Bobina de choque común	Bobina de choque común THT modelo ALFT-034
Inductor	Inductor SMD modelo CDRH74
Relevador	Relevador de 5 pines THT modelo SRD-12VDC-SL-C
Terminal de tornillo de 2 posiciones	Terminal de conexión (bornera) THT de dos posiciones, con un paso de 5.08 mm
Terminal de tornillo de 3 posiciones	Terminal de conexión (bornera) THT de dos posiciones, con un paso de 5.08 mm
Push button	Push button SMD de 4 pines modelo 61304021121
Transistor	Transistor NPN a 40V SMD modelo MMBT3904LT1G con un tipo de empaquetado SOT95
Resistencias 1M $\Omega$ , 100k $\Omega$ , 10k $\Omega$ , 4.7k $\Omega$ , 330 $\Omega$ , 22 $\Omega$	Resistencias SMD 0603
Varistor	Varistor THT modelo 10D511K
Microcontrolador	Microcontrolador STM32F407VGT6 empaquetado LQFP100-14x14 mm
Fuente de voltaje	Módulo de fuente de voltaje modelo HLK-20M12
Regulador reductor de voltaje	Regulador reductor de voltaje de 5 pines SMD con empaquetado TO-263
Optoacoplador	Optoisolator SMD de 6 pines con empaquetado SOT254
Puerto micro USB	Puerto micro-USB tipo B THT
Cristal	Cristal de 8MHz con footprint 5032
Header 10x2A	Header de 10x2 posiciones con un paso de 2.54 mm

Fuente: Elaboración propia.



Altium Designer permite generar librerías de las partes del PCB, las cuales incluyen los footprints y esquemáticos de cada componente implementado. Cabe mencionar que para el desarrollo de los footprints se hizo uso de la hoja de datos de cada componente. Una vez que se generó la librería de componentes lo siguiente a realizar fueron los diagramas esquemáticos. En el anexo 1 se adjuntan los documentos de los diagramas esquemáticos de los circuitos implementados para el desarrollo de al PCB generados en el software de Altium Designer.

Posteriormente se llevó a cabo la distribución de los componentes en el documento PcbDoc. de Altium Designer. En la figura 37 se puede apreciar la distribución de los componentes desde la vista de modo planificación de tablero, debido a que es de donde se configuran las dimensiones de la placa. También se observa que los módulos de entradas y salidas se ubican en los extremos opuestos de la placa para permitir un fácil acceso.



**Figura 37.** Distribución de los componentes del PCB.  
Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

Por otro lado, Altium Designer ofrece tres tipos de modos de vista, los cuales son; el modo de planificación de tablero, en donde se pueden realizar modificaciones de tamaño, definir líneas de división, entre otras funciones. En segundo lugar, se encuentra el modo de diseño 2D y es donde se realiza todo lo que conlleva el diseño e integra todas las capas de la placa. En este modo se llevan a cabo las rutas, polígonos, leyendas, modificaciones, entre otras funciones. El tercero corresponde al modo de diseño 3D y en él se visualiza la placa con todos los componentes incorporados. Para lograr la visualización de los componentes, Altium Designer permite diseñarlos o anexarlos en formato Step desde el modo de vista 2D y toma como referencia a estos componentes como capas mecánicas. En la figura 38 se muestran la distribución de los componentes vista desde el modo de diseño 2D, donde se agregan las capas mecánicas de los componentes.

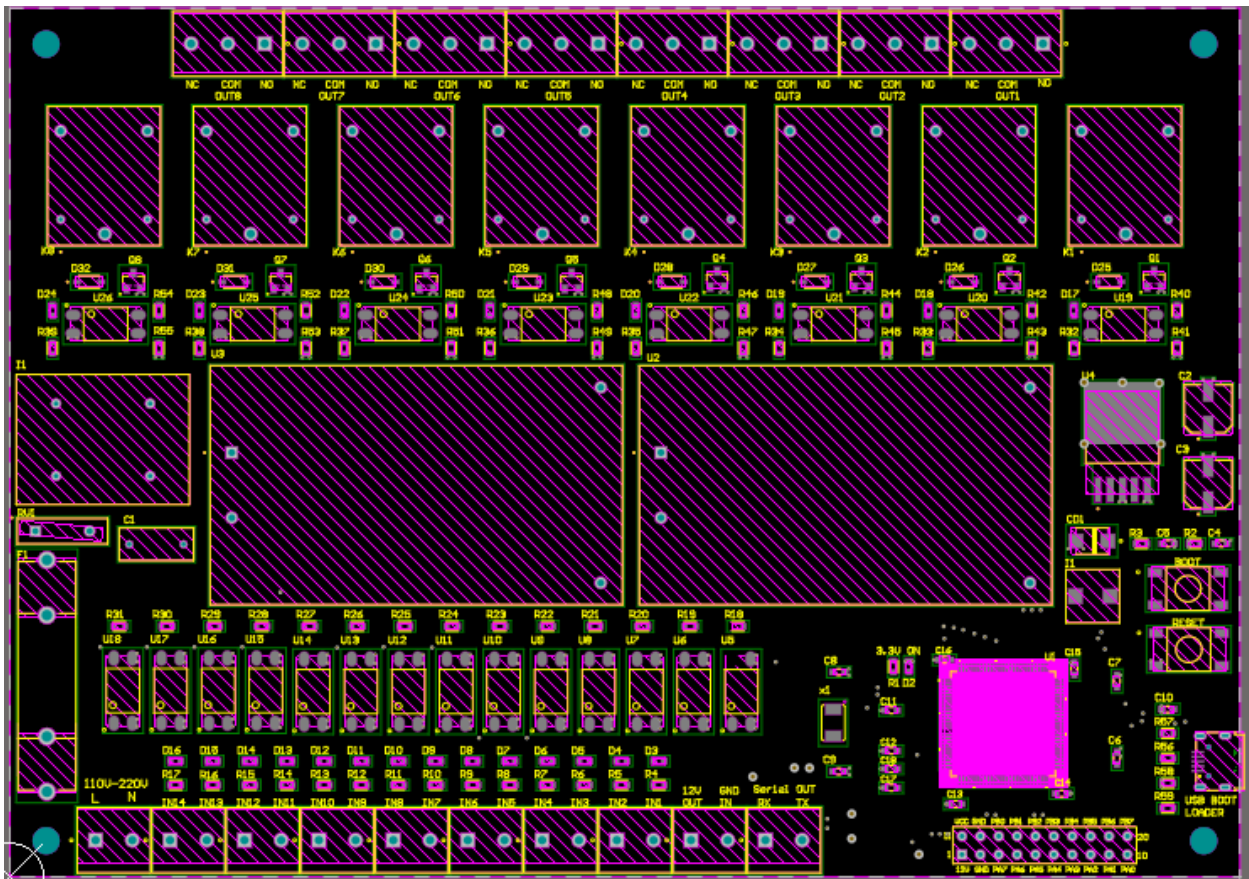


Figura 38. Distribución de componentes y visualización de capas mecánicas.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

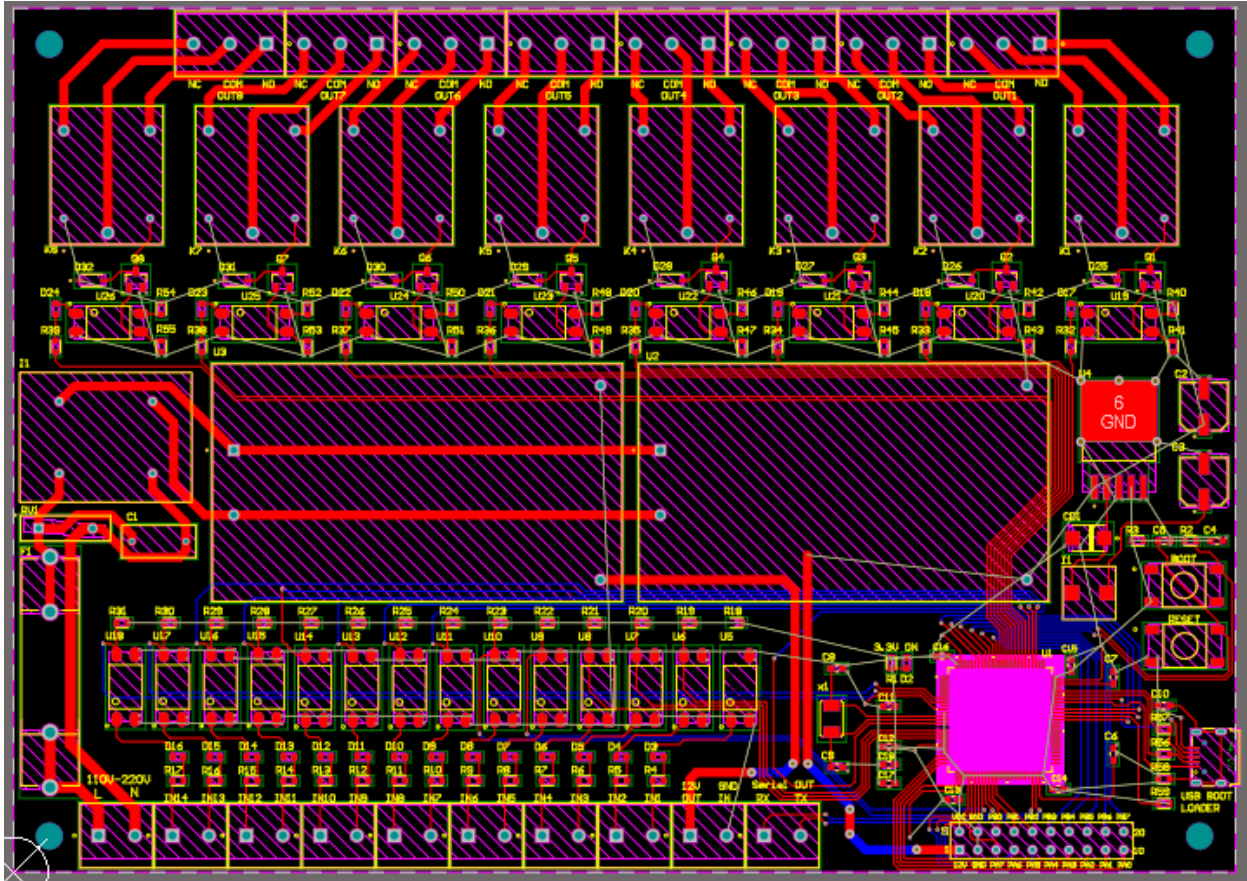
Antes de realizar el enrutado de la placa PCB, se establecieron algunas reglas de diseño, las cuales permiten que su costo de fabricación sea menor, además de que elimina errores eléctricos sobre el PCB. En la tabla 19 se presentan algunas de las reglas más importantes que ofrece Altium Designer.

**Tabla 19.** Reglas de diseño para PCB.

<b>Reglas de diseño para PCB</b>	
<b>Eléctricas</b>	
Clearance	≥ 7 mil
<b>Enrutamiento</b>	
Width	7 mil (mín) - 60 mil (máx)
Routing Corners	45 °
Vía hole size	13 mil (mín) - 196 mil (máx)
<b>Manufactura</b>	
Hole size	≥ 3 mil
Hole to hole clearance	≥ 10 mil
Minimum solder mask silver	≥ 3 mil

Fuente: Elaboración propia.

La placa PCB dispone de dos capas con mascarilla antisoldante, lo que facilita el enrutado. El espesor de la línea de ruta para la alimentación del PLC es de 70 mil (milésimas de pulgada), mientras que la línea de ruta encargada de las señales digitales tiene un espesor de 19.685 mil. Todos los componentes electrónicos se encuentran ubicados en la capa superior del PCB (Top Layer), lo que permite un ensamble más efectivo. Por otra parte, para poder realizar la conexión de rutas entre la capa superior y la capa inferior (Bottom Layer) se utilizaron vías de conexión, en su mayoría con un diámetro de 31.496 mil y un agujero de 13.78 mil. Las rutas tienen un ángulo de 45° para evitar pérdidas de señales, además de tener una separación de 7 mil entre cada una. Cabe mencionar que la alimentación VCC y GND no se conectaron mediante rutas, sino por polígonos. Los polígonos se implementan comúnmente para crear planos de potencia y planos de señal para conectar a los componentes y se pueden utilizar para ayudar con la distribución de calor. En la figura 39 se muestra el ruteo de las pistas para la capa superior e inferior del PCB.

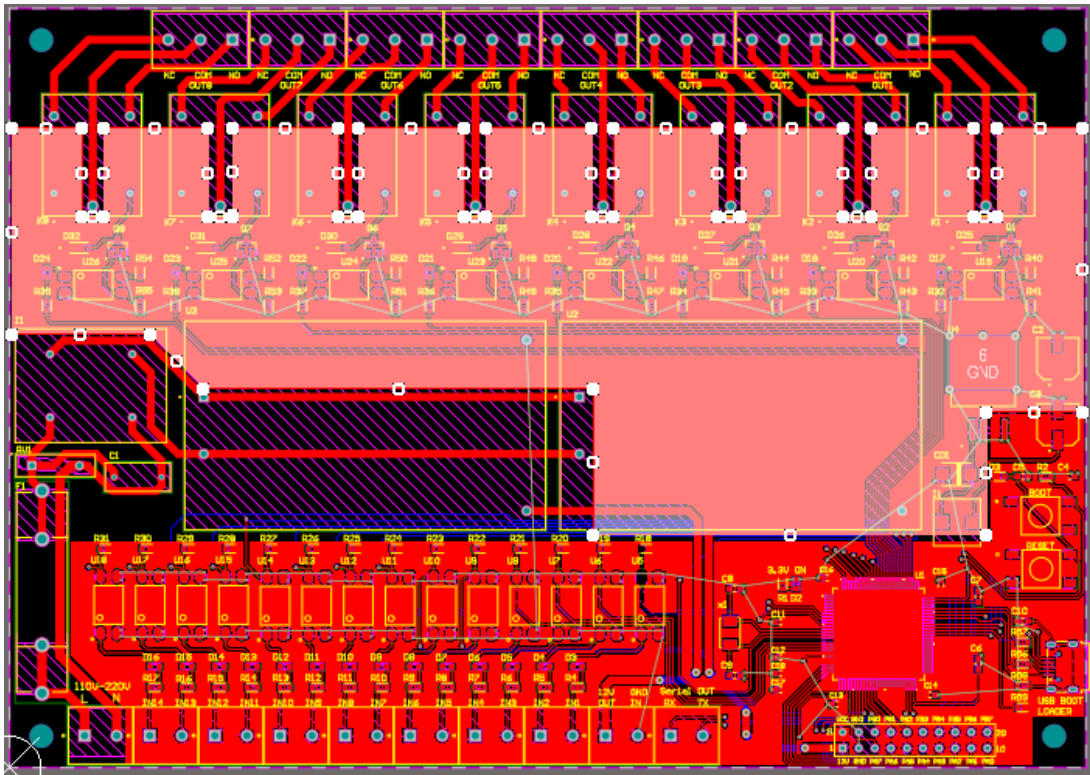


**Figura 39.** Ruteo de pistas de la capa superior e inferior del PCB.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

Se contempla que la placa PCB cuenta con sus conexiones correspondientes, sin embargo, aún se muestran líneas sin conectar debido a que los voltajes y señales a GND no se encuentran conectados como se mencionó anteriormente. En la capa superior se implementaron dos polígonos que corresponden a los voltajes de VCC y 12 VDC respectivamente. Ambos polígonos están configurados para la eliminación de cobre muerto, lo que hace que el polígono actúe con mayor eficiencia y tenga una mejor disipación de calor. Asimismo, en la capa inferior de la placa PCB se implementaron dos polígonos correspondientes a GND-IN y GND. Para esta parte se tiene que considerar que los componentes de superficie montada (SMD) colocados en la capa superior no tienen forma de conectar sus pads de GND hacia la capa inferior, por lo cual, se implementaron vías sobre los pad conectados a GND para poder realizar la conexión entre capas y dependiendo el tamaño del pad, fue la cantidad de vías que se colocaron.

En la figura 40 se muestran los polígonos implementados en la capa superior de la placa PCB.

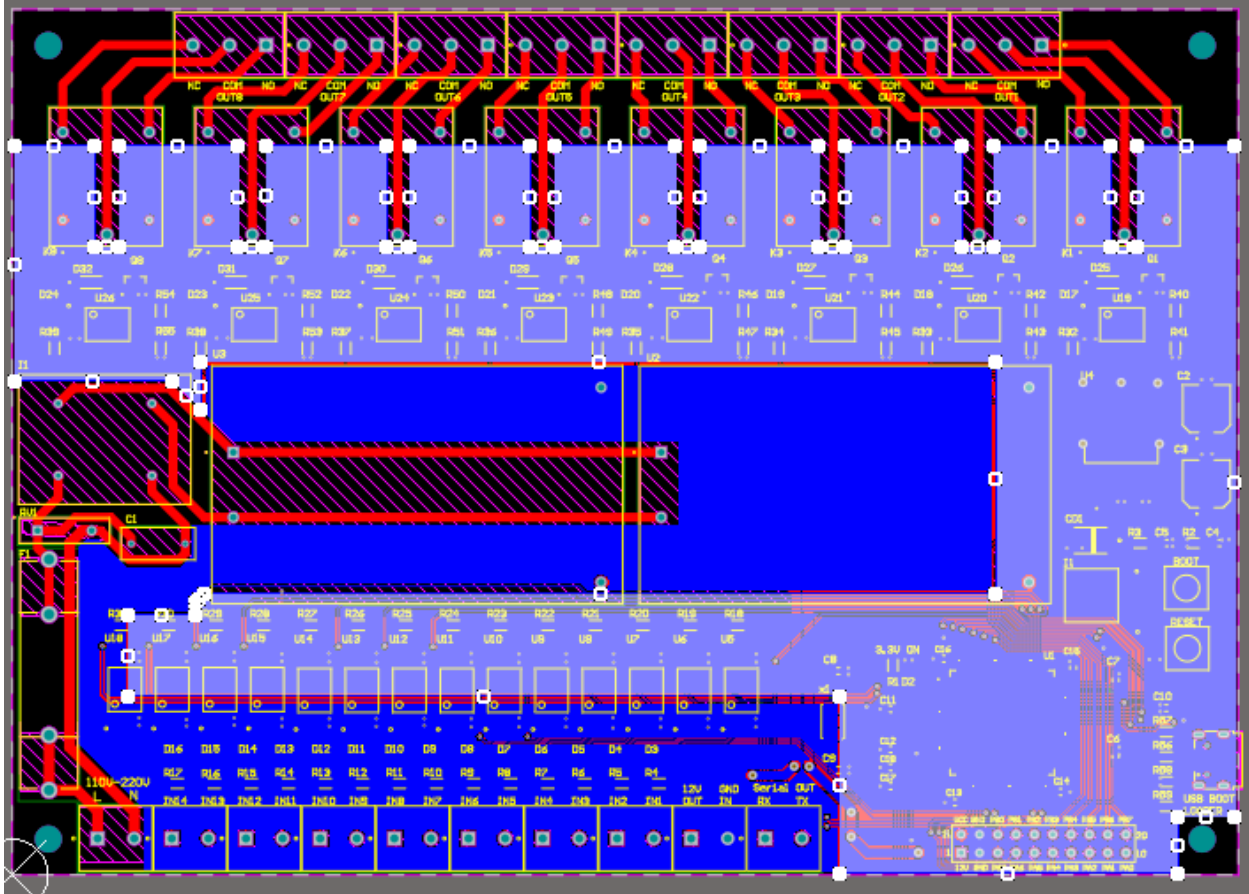


**Figura 40.** Polígonos de voltaje ubicados en la capa superior del PCB.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

Como puede observarse en la imagen, los dos polígonos de voltaje de la placa PCB. Para una mejor visualización, se seleccionó uno de los polígonos porque se encuentran juntos y de no seleccionarse, es complicado poder identificar uno del otro. El polígono seleccionado corresponde al voltaje de 12 VDC, mientras que el otro polígono pertenece al voltaje VCC. Para poder implementar los polígonos es importante tener en cuenta que no es conveniente dejar polígonos en el área de alimentación AC, por tal motivo, las pistas de voltaje AC se encuentran descubiertas.

En la figura 41 se muestran los polígonos que corresponden a GND y GND-IN, implementados en la capa superior de la placa PCB.



**Figura 41.** Polígonos de GND ubicados en la capa inferior del PCB.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

En la figura 41, el polígono seleccionado corresponde al de GND, el cual está asignado a las salidas del PLC, en tanto que, el otro polígono pertenece a GND-IN, destinado a las entradas del PLC.

## CAPITULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del diseño del PLC, además se realizó un análisis comparativo con los proyectos de referencia y con dispositivos comerciales, lo que permite determinar que el presente diseño cumple con las especificaciones requeridas de un PLC y a su vez, que cumple con los objetivos establecidos en el presente proyecto.

### 4.1. Diseño final de la PCB

Como se mencionó anteriormente, el diseño de la placa PCB que correspondiente al PLC se realizó en Altium Designer, con la finalidad de generar reglas adecuadas de diseño para poder ser validado por los fabricantes de PCBs. En la figura 42 se muestra el diseño final la placa PCB.

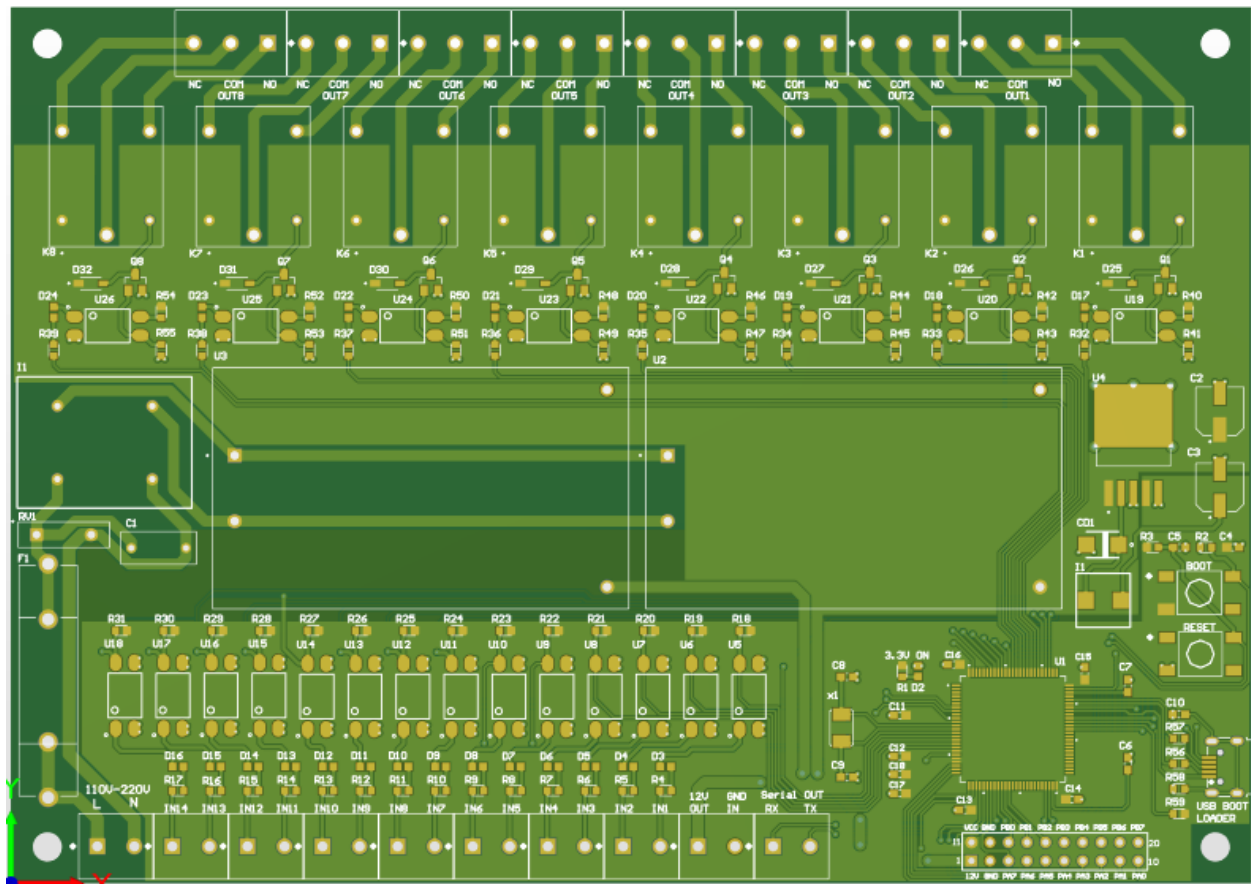
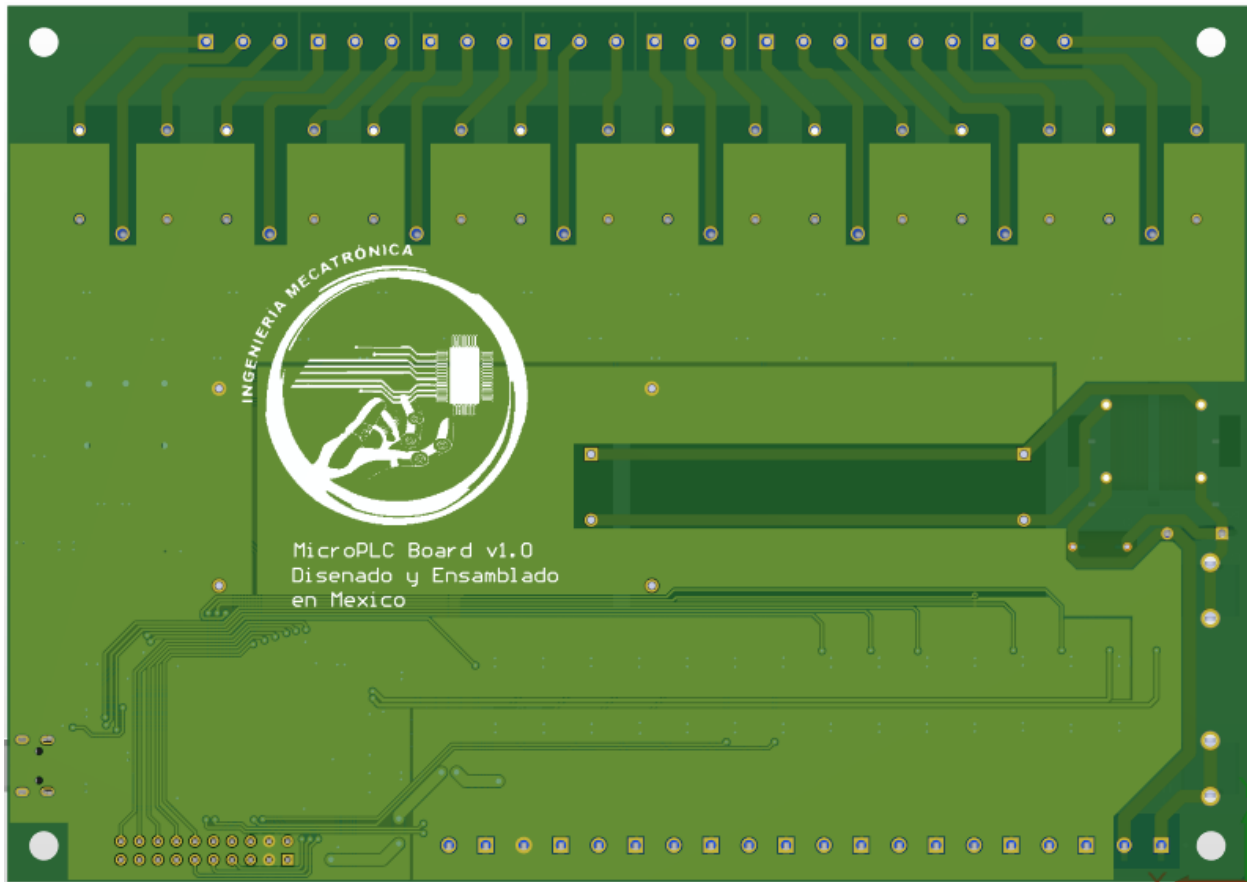


Figura 42. Vista superior de la placa PCB del Controlador Lógico Programable.

Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

En la figura 43 se observa la vista inferior de la placa PCB del PLC. Desde esta vista, se pueden observar las dos capas de GND, además del nombre que se le asignó al dispositivo.



**Figura 43.** Vista inferior de la placa PCB del Controlador Lógico Programable.

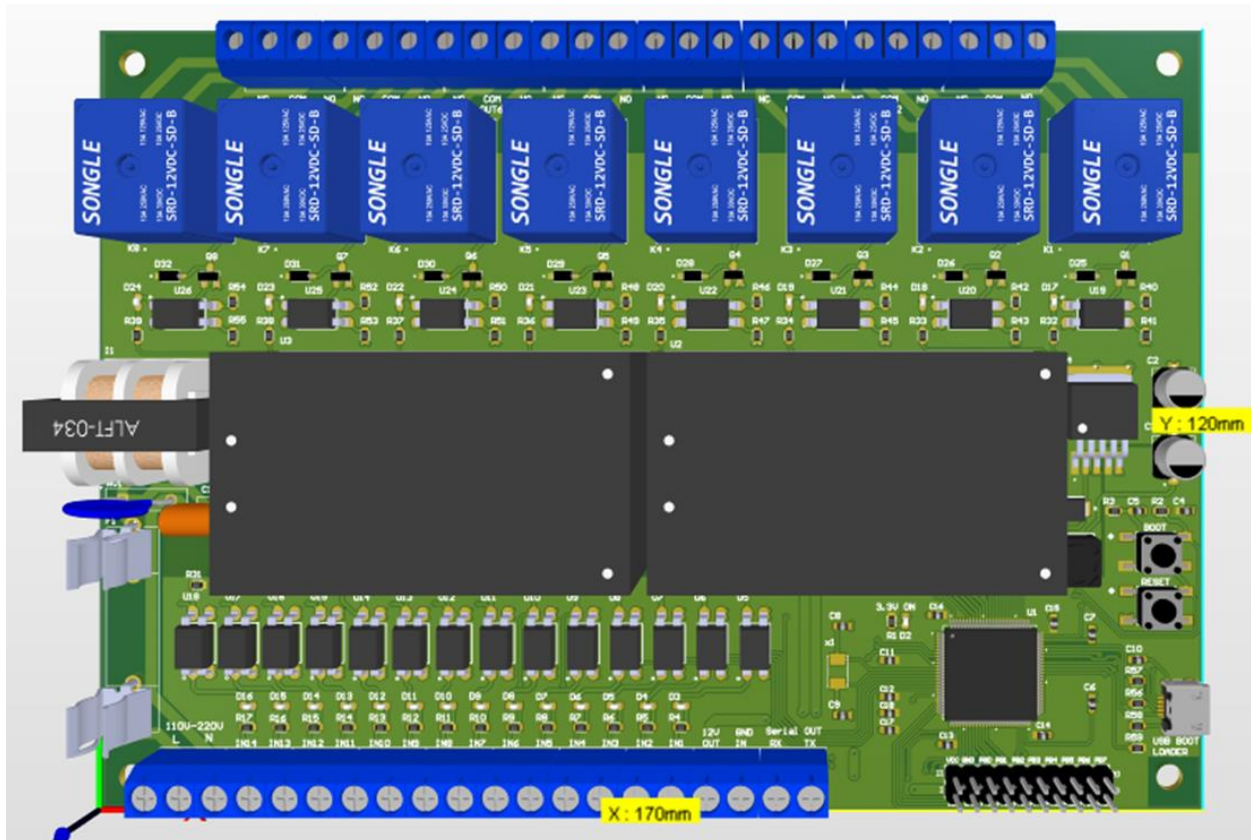
Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

Como se observa en las dos figuras anteriores, Altium Designer permite tener una visualización real de la PCB, además de favorecer a reducir la brecha entre el diseño y fabricación, lo que facilita administrar de forma activa la generación y verificación de los datos del diseño. En el lapso del diseño de la placa de circuito impreso, la selección de los componentes fue pieza clave para el desarrollo del presente proyecto, debido a que la elección de un componente obsoleto o fuera de stock, daría lugar a que la producción tuviera largos retrasos y sobrecostos en la manufactura de la placa.

Para alcanzar los objetivos del diseño final de la placa de circuito impreso del PLC, la creación de librerías proporciona los recursos de información necesarios para mantener un



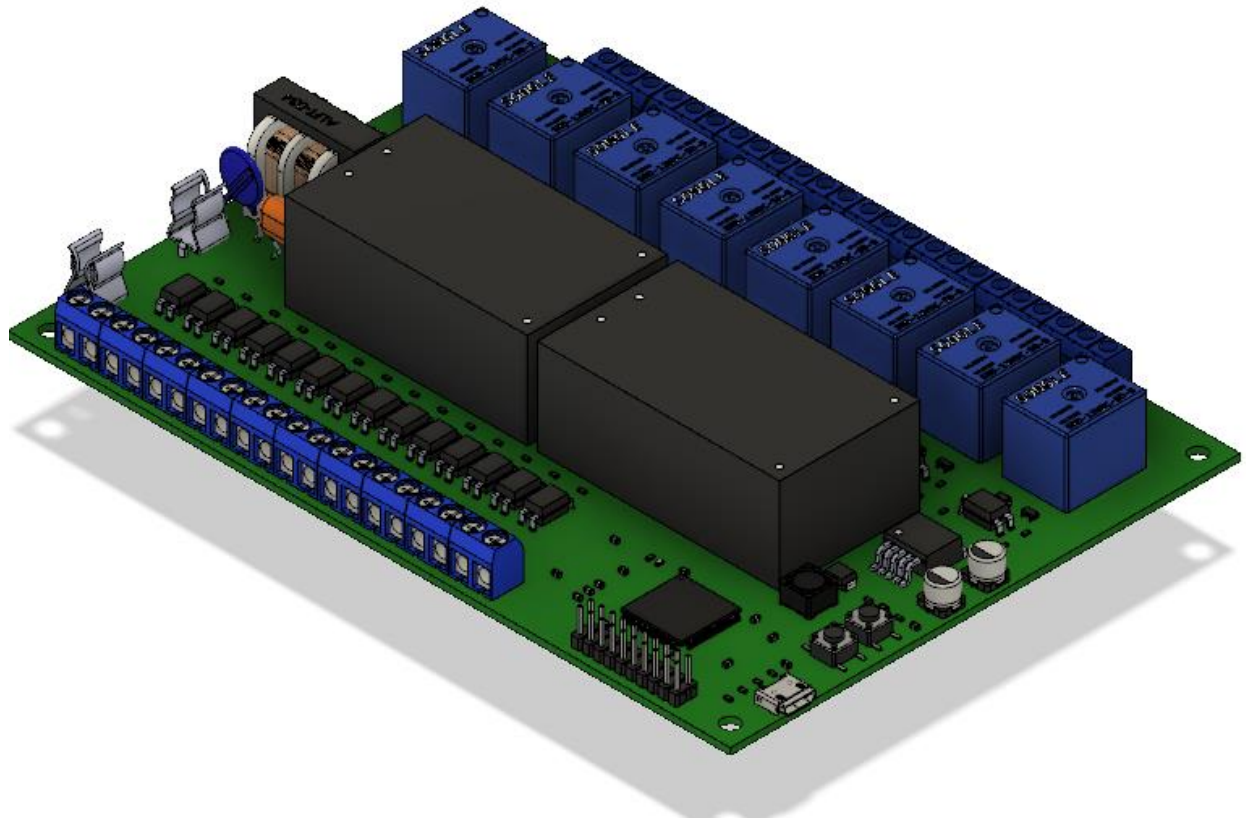
control sobre las características de diseño de cada componente y también proporciona una visualización real de dimensiones del PCB. En la figura 44 se muestra la placa de circuito impreso del PLC con la vista de los componentes en 3D y donde se observan las dimensiones en milímetros.



**Figura 44.** Vista del diseño final de la PCB del Controlador Lógico Programable.  
Fuente: Propia, elaborada en Altium Designer.

También, otra de las ventajas que presenta el software de Altium Designer es que tiene la función de exportar diseños 3D en formato STEP, con la finalidad de poder visualizar la placa PCB desde cualquier software de diseño CAD, lo que permite poder realizar cualquier pieza a partir del diseño de la placa de circuito impreso y, de esta manera poder implementar el PLC en cualquier aplicación, desde diseñar el armazón deseado o incluso llevar a cabo el diseño de algún tablero.

En la figura 45 se observa la vista isométrica de la placa PCB del PLC en el software CAD Fusión 360.



**Figura 45.** Vista isométrica de la PCB en Fusión 360 del Controlador Lógico Programable.

Fuente: Propia, elaborada en Fusión 360.

Anteriormente, a lo largo del desarrollo del presente escrito, se mencionó que la placa PCB será ensamblada por la empresa Intesc Electronics & Embedded. En la tabla 20 se muestran las características generales de fabricación y ensamble de la placa PCB del PLC.

**Tabla 20.** Características de la placa PCB.

<b>Características del PCB</b>	
<b>Fabricación</b>	
Tamaño	170 x 120 mm
Capas	2
Grosor de sustrato	1.64 mm
Cobre	1 oz
Mascarilla antisoldante	Verde
Tipo de acabado	HASL-LEAD
<b>Ensamble</b>	
Ensamble de PCB	1 cara
No. Componentes SMD	145
No. Componentes THT	33

Fuente: Elaboración propia.

El micro PLC Board v1.0 se encuentra diseñado sobre una placa PCB de dimensiones de 120 x 170 mm de dos capas. En la figura 46 se muestra la distribución de los componentes del sistema del PLC, así como también la distribución de los pines del microcontrolador.

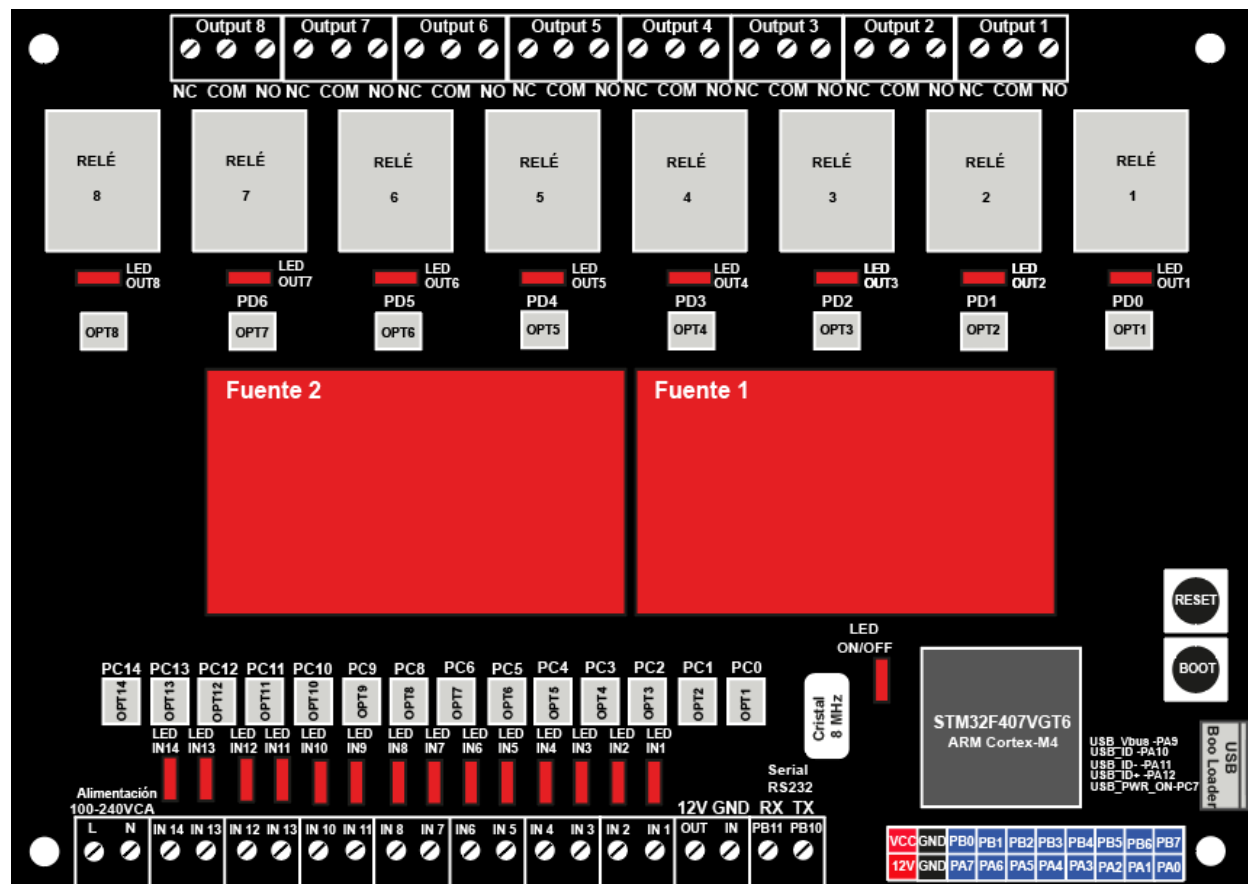


Figura 46. Conexiones de la placa PCB del Controlador Lógico Programable.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior, se puede observar la distribución física de los componentes de una mejor manera en comparación con el diseño 3D. Esto sirve para identificar el posicionamiento de los pines del microcontrolador, con la finalidad de que el usuario pueda localizarlos de manera rápida.

#### 4.1.1. Análisis comparativo

Como parte del resultado, se presenta una comparación entre las especificaciones finales del diseño del PLC y los dos PLC que se tomaron como referencias del proyecto, los cuales corresponden a el PLC didáctico y el PLC IoT. En la tabla 21 se presenta una tabla de

comparación de las especificaciones generales, especificaciones que corresponden al sistema de control, así como también especificaciones eléctricas y de los módulos de entrada y salida.

**Tabla 21.** Comparación de especificaciones de PLC´s.

<b>Tabla de comparación de PLC´s</b>			
<b>Especificaciones generales</b>			
Modelo	PLC didáctico	PLC IoT	Micro PLC Board v1.0
País de origen	México	Perú	México
Precio total (USD)	-	\$217.20	Por definir
Precio sistema electrónico (USD)	-	\$187.45	\$198.96
Dimensiones	-	1.6x102.2x157.5mm	1.6x120x170mm
<b>Sistema electrónico</b>			
<b>Controlador</b>			
Plataforma	Arduino	Raspberry Pi 4	STM32
Microcontrolador	Atmel AVR-AT Mega8	ARM-Cortex A72	ARM Cortex M-4
No. De bits	8 bits	64 bits	32 bits
Sistema operativo	Arduino OS	Raspberry Pi OS	MicroPython OS
<b>Especificaciones eléctricas</b>			
Alimentación	127 VAC	5 VDC	100-240 VAC
Consumo	-	15 W	20 W
Fuentes externas	Sí	No	Sí
<b>Entradas/Salidas</b>			
<b>Entradas digitales</b>			
No. De entradas digitales	4	7	14
Voltaje	24 VDC	24 VDC	12-24 VDC
Corriente	7 mA	-	-
<b>Entradas Analógicas</b>			
No. De entradas analógicas	2	No	No
Rango de voltaje	0 a 10 VDC	-	-
<b>Salidas digitales (relé)</b>			
No. De salidas digitales	4	6	8
Voltaje máx	220 VAC	240 VAC	240 VAC
Corriente	10 A	10 A	10A

Fuente: Elaboración propia

En las especificaciones generales, se puede deducir, que el sistema electrónico del PLC IoT es menor, sin embargo, se analizaran de manera general los demás puntos de comparación para determinar si es costo el diseño de nuestro PCB es justo y se encuentra dentro de la competencia de proyectos ya implementados.

En el sistema electrónico, resalta de igual manera el PLC IoT, no obstante, cabe mencionar que el microcontrolador que se implementó en dicho PLC está dedicado para aplicaciones específicas de IoT. Esta parte correspondería a las mejoras del proyecto, es decir, si se desea trabajar con aplicaciones industriales IoT, la solución es implementar un microcontrolador con conexiones inalámbricas. Por otro lado, en las características eléctricas resalta nuestro diseño, debido a que es capaz de trabajar con voltaje de corriente alterna, además de tener un rango de voltaje considerable, mientras que los otros dos PLC no poseen con esas características. Además, una de las ventajas que cuenta el presente diseño es que el número de entradas y salidas es mayor, a causa de que cuenta con 14 entradas digitales y 8 salidas de tipo relé, sin embargo, a pesar de no contar con ninguna señal digital, cuenta con un puerto de expansión el cual tiene como objetivo implementar una segunda tarjeta de señales analógicas.

De esta manera, se resalta que el diseño electrónico del PLC cumple con los requerimientos y las características necesarias, resaltando en el número de entradas, el tipo y rango de alimentación, que cuenta con la opción de un puerto de expansión de 16 pines y que su precio es justo en comparación con los proyectos de referencia, lo cual, hace que el proyecto cumpla con los objetivos establecidos.

Para el análisis comparativo entre los PLC comerciales y el Micro PLC Board v1.0, se tomó como referencia un modelo de PLC de dos grandes compañías en la industria de la automatización, Siemens y Allen Bradley, sin embargo, para poder determinar la eficiencia, robustez o incluso la elección de un PLC, las características más importantes que se consideraron fueron las siguientes:

- Tipo de PLC: Define el tipo de alimentación y el tipo de entradas y salidas de un PLC.
- Voltaje de alimentación: Identifica el rango de valores de voltaje.
- Memoria: Determina la capacidad de memoria de trabajo del PLC.
- Comunicación: Establece los protocolos de comunicación que soporta el PLC.

- Entradas: Corresponde al número de entradas digitales y/o analógicas, además de considerar el voltaje de entrada admisible.
- Salidas: indica el número de salidas digitales a transistor o relevador del PLC.
- Costo: Corresponde al precio del dispositivo en moneda nacional (MXN).

En la tabla 22 se muestra la comparación entre el Micro PLC Board v1.0, El PLC Siemens S7-1200 y el PLC Allen Bradley de la familia 800.

**Tabla 22.** Tabla de comparación de PLC's comerciales vs Micro PLC Board v1.0.

<b>Tabla de comparación PLC's comerciales VS Micro PLC Board v1.0</b>			
<b>Características</b>	<b>Micro PLC Board v1.0</b>	<b>2080-LC20-20QWB Allen-Bradley</b>	<b>S7-1200 PLC SIEMENS (CPU 1212C)</b>
<b>Tipo de PLC</b>	AC/DC/Relay	DC/DC/Relay	DC/DC/Relay
<b>Voltaje de alimentación</b>			
Voltaje nominal de alimentación	127 VAC	24 VDC	24 VDC
Rango de voltaje admisible	100 - 240 VAC	20.4 - 26.4 VDC	20.4 - 28.8 VDC
Protección contra inversión de polaridad	Sí	Sí	Sí
<b>Memoria</b>			
Memoria de carga integrada	1 Mbyte	2 Mbyte	75 Kbyte
<b>Comunicación</b>			
Protocolos que soporta	USART SPI I2C CAN-BUS	RS232/RS485 EtherNet/IP Modbus TCP DHCP Client	PROFINET PROFIBUS ModBus Ethernet
<b>Entradas (Input)</b>			
<b>Entradas Digitales</b>			
Nº de entradas digitales	14	12	8
Valor nominal (DC)	12-24 VDC	24 VDC	24 VDC
<b>Entradas Analógicas</b>			
Nº de entradas analógicas	8 disponibles a través de un puerto/modulo de expansión	1	2
Rangos de entrada (valores nominales)	-	0 a 10V	0 a 10V
<b>Salidas (Output)</b>			
<b>Salidas digitales</b>			
Salidas digitales a relevador	Sí	Sí	Sí
Nº de salidas digitales	8	7	6
Tensión de salida máx.	240 VAC	240 VAC	-
<b>Costo</b>			
Precio del dispositivo (MXN)	\$ 4,005.00	\$ 9,000.00	\$ 8,669.00

Fuente: Elaboración propia.

Para valorar la eficiencia del diseño del PLC, se elaboró una lista de cotejo tomando en cuenta diez de los criterios más importantes. La finalidad de la evaluación es demostrar que el diseño del PLC cumple con los criterios y características de funcionalidad de un PLC comercial. Los puntajes considerados corresponden al 100%, 70% y 0% dependiendo si cumple o no, con los criterios a evaluar.

- 100% - Corresponde a que el diseño cumple y presenta ventajas contra las existentes.
- 70% - Corresponde a que el diseño si cumple con los criterios establecidos, pero no supera las propuestas existentes.
- 70%- Corresponde a que el diseño no cumple con los criterios, pero presenta una alternativa de solución.
- 0% - Corresponde a que el diseño no cumple y no presenta ninguna solución alternativa.

En la tabla 23 se muestra la lista de cotejo para la evaluación del micro PLC Board v1.0

**Tabla 23.** Lista de cotejo para la evaluación del diseño del PLC.

<b>LISTA DE COTEJO PARA EVALUACIÓN DEL Micro PLC Board v1.0</b>						
	<b>Criterio</b>	<b>%</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>Puntuación obtenida</b>	<b>Observaciones</b>
1	Voltaje de alimentación	10	X		10	
2	Niveles de voltaje admisibles en sus entradas	10	X		10	
3	Memoria	10	X		7	70% porque tiene 1Mb
4	Protocolos de comunicación	10	X		10	
5	Entradas digitales	10	X		10	
6	Entradas analógicas	10	X		7	70% El diseño tiene 8 a través de un puerto de expansión.
7	Salidas digitales a relevador	10	X		10	
8	Diseño robusto	10	X		10	
9	Módulos Integrados (PID o módulos para motores)	10		X	7	No, pero el microcontrolador si tiene periféricos hardware como PWM para control de motores y puede ejecutar un control PID.
10	Modo de Programación	10	X		10	Presenta las ventajas de programarse en C o Python.
<b>CALIFICACIÓN</b>					<b>91</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Se puede señalar que los puntos débiles del diseño del PLC Board v1.0 se encuentra la memoria de programa, entradas analógicas y los módulos integrados, sin embargo, con esta evaluación

se puede concluir que el diseño cumple con un 91% de calificación en comparación con los PLC comerciales.

#### 4.1.2. Resumen de resultados

En este apartado, se da como resultado que el diseño de la placa PCB del Controlador Lógico Programable cumple con las características requeridas para la aplicación que es destinado, la cual es la automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla. Para comprobar que realmente cumple con su funcionamiento, se recopiló información acerca del motor de la máquina.

En la tabla 23 se muestran las características generales del motor de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla.

**Tabla 24.** Especificaciones generales del motor de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla.

<b>Especificaciones del motor</b>	
Tipo	Monofasico
Potencia	1 HP
Voltaje de operación	110 VAC
Reducción	1:10

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla, el voltaje de operación del motor es de 110 VAC, lo que da como resultado que el diseño del PLC cumple correctamente con la función, debido a que el voltaje máximo del módulo de salidas es de 250 VAC.

#### 4.2. Costos de fabricación

Como se ha hecho mención, el ensamble de la placa de circuito impreso será realizado por la empresa Intesc Electronics & Embedded ubicada en la ciudad de Puebla, México, dedicada al diseño de sistemas embebidos, además de ofrecer una gran variedad de servicios y entre ellos el ensamble de circuitos impresos. En el anexo 2 se adjunta la cotización de la lista de componentes y en el anexo 3 del costo de la fabricación y ensamble. Cabe mencionar que en dicha cotización se hizo para el ensamble de 2 placas PCB y, además las piezas mínimas que



se pueden fabricar son 5. En la tabla 24 se muestran los costos unitarios y totales de los componentes para una sola placa PCB, los precios están dados en moneda nacional (MXN).

**Tabla 25.** Costo unitario y total de los componentes de la placa PCB.

<b>Componentes electrónicos</b>			
<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P/unitario (MXN)</b>	<b>Total (MXN)</b>
Capacitor 470uF/16V	1	\$ 7.76	\$ 7.76
Capacitor 100uF/16V	1	\$ 5.60	\$ 5.60
Capacitor de poliéster 250VAC	1	\$ 4.74	\$ 4.74
Capacitor genérico 100nF	11	\$ 0.86	\$ 9.46
Capacitor genérico 2.2uF	2	\$ 1.29	\$ 2.58
Capacitor genérico 22pF	2	\$ 0.86	\$ 1.72
Diodo SS54B	1	\$ 4.31	\$ 4.31
LED SMD 0603	23	\$ 0.86	\$ 19.78
Diodo 1N5819HW-7-F	8	\$ 1.29	\$ 10.32
Fusible tipo americano	1	\$ 2.59	\$ 2.59
Bobina de choque común	1	\$ 30.17	\$ 30.17
Inductor CDRH74	1	\$ 12.93	\$ 12.93
Relevador 12VDC	8	\$ 10.34	\$ 82.72
Terminal 2 pos (bornera)	10	\$ 3.02	\$ 30.20
Terminal 3 pos (bornera)	8	\$ 5.17	\$ 41.36
Push button 4 pin SMD	2	\$ 1.72	\$ 3.44
Header 10x2	1	\$ 2.59	\$ 2.59
Transistor MMBT3904LT1G	8	\$ 2.59	\$ 20.72
Resistencia 1M $\Omega$	1	\$ 0.23	\$ 0.23
Resistencia 100k $\Omega$	2	\$ 0.23	\$ 0.46
Resistencia 10k $\Omega$	9	\$ 0.23	\$ 2.07
Resistencia 1k $\Omega$	9	\$ 0.23	\$ 2.07
Resistencia 4.7k $\Omega$	14	\$ 0.21	\$ 2.94
Resistencia 330 $\Omega$	22	\$ 0.21	\$ 4.62
Resistencia 22 $\Omega$	2	\$ 0.23	\$ 0.46
Varistor	1	\$ 17.24	\$ 17.24
Microcontrolador STM32F407	1	\$ 520.00	\$ 520.00
Fuente de alimentación	2	\$ 193.96	\$ 387.92
Regulador de voltaje	1	\$ 30.17	\$ 30.17
Optoacoplador	22	\$ 3.45	\$ 75.90
Puerto Micro USB	1	\$ 4.31	\$ 4.31
Cristal oscilador	1	\$ 6.03	\$ 6.03
Total antes de impuestos (MXN):			1,347.41
Impuestos 16% (MXN)			215.59
Total (MXN)			1,562.99
Total (USD)			77.64

Fuente: Elaboración propia.

El costo total por todos los componentes de la placa PCB del PLC es de \$77.67 USD, considerando que la cotización se realizó en el mes de julio del año 2022. El diseño requiere de 145 componentes de superficie montada (SMD) y 33 componentes de agujero pasante (THT).

En la tabla 25 se observa el costo total por la placa PCB terminada, incluyendo el costo de fabricación, componentes y ensamble.

**Tabla 26.** Costo de implementación del PLC.

<b>Costo de implementación del PLC</b>		
Ítem	Descripción	Importe
1	Componentes electrónicos	1,562.99
2	Fabricación del PCB	\$ 1,992.00
3	Ensamble	\$ 450.00
Total MXN		\$ 4,004.99
Total USD		\$ 198.96

Fuente: Elaboración propia.

El costo total de la implementación del PLC, con la cotización de la empresa Intesc Electronics & Embedded es de \$ 4,004.99 pesos mexicanos, lo que correspondería a \$198.96 USD, tomando el precio promedio del dólar de \$20.13 durante el mes de agosto.

## CONCLUSIONES

El presente proyecto presentó el diseño de la placa PCB de un controlador lógico programable (PLC) utilizando un microcontrolador ARM Cortex-M4 como unidad central de procesamiento. El diseño presenta catorce entradas y ocho salidas digitales optoacopladas. Las salidas son de tipo relevador capaces de manejar elevadas cargas de corriente, además de que cada terminal común de cada relevador es independiente, lo que permite al usuario conectar diferentes cargas de voltaje a cada salida. También se integró un puerto micro USB tipo B para la programación del microcontrolador, de la misma manera que un puerto de expansión de veinte pines, los cuales dos son de alimentación VCC y 12 VDC, dos corresponden a GND y los dieciséis restantes se encuentran conectados a dos puertos GPIO del microcontrolador. El motivo de este puerto es para la implementación de tarjetas de expansión, lo que corresponde a las mejores del proyecto. Para el desarrollo de la placa PCB se utilizó el software Altium Designer.

Por último, este proyecto cuenta las características generales y de funcionamiento de un PLC y puede ser implementado para la automatización de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla, además de que su costo de desarrollo es menor en comparación al de muchos PLC que implementan características de hardware similares, lo que lleva al objetivo principal de este proyecto.

## RECOMENDACIONES

1. Durante el uso del dispositivo es recomendable implementar disipadores o ventiladores para mantener una temperatura estable de la electrónica.
2. El dispositivo cuenta con un puerto de expansión conectados a dos puertos GPIO del microcontrolador, por lo que se recomienda implementar una segunda tarjeta de expansión que ofrezca entradas analógicas.
3. Si se desea trabajar con aplicaciones IoT y que se requieran mayores recursos de procesamiento se pueden implementar microcontroladores superiores como por ejemplo el microcontrolador ARM Cortex-M7.
4. Si se desea un control más confiable en las salidas se recomienda utilizar relevadores de estado sólido, debido a que tiene una mayor eficiencia de conmutación y además son de menor tamaño.
5. Para aplicaciones específicas, se recomienda incorporar una fuente para que pueda ser alimentado con corriente continua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, Y. (2016). *Practical Microcontroller Engineering with ARM Technology* . Canada: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Bates, M. (2004). *Pic Microcontrollers and Introction to Microelectronics* . Jordan Hill, Oxford: Newnes.
- Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controllers*. Burlington, MA: ELSEVIER.
- Daneri, P. A. (2008). *PLC Automatización y Control Industrial* . Buenos Aires, Argentina: 1ra ed. HASA.
- David Calcultt, F. C. (2004). *8051 Microcontroller : An Applications Based Introduction*. Amsterdam: Newnes.
- Embedded, I. E. (2017). *Tarjeta de desarrollo Ophyra*. Obtenido de <https://intesc.mx/productos/tarjeta-de-desarrollo-ophyra/>
- Frank D, P. (2011). *Programmable Logic Controller*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Gunther Gridling, B. W. (2007). *Introduction to Microcontrollers*. Austria: Vienna University of Technology.
- Hanssen, D. H. (2015). *Programmable Logic Controllers*. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons. Ltd.
- Ibrahim, D. (2002). *Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control*. Jordan Hill, Oxford : Newnes.
- Ibrahim, D. (2019). *ARM-Based Microcontroller Projects Using MBED*. Kidlington, UK: Newnes.
- Jones, C. (1996). *Programmable Logic Controllers The Complete Guide to the Tecnology*. United States of America: Pat Grindel.
- Joshi Vaibhav Vijay, B. B. (2015). ARM Processor Architecture, Evolution and Applications. *International Journal of Science*, 3.
- L. A. Bryan, E. A. (1998). *PROGRAMMABLE CONTROLLERS THEORY AND IMPLEMENTATION*. United States of America: An Industrial Text Company Publication.

Lacamera, D. (2018). *Embedded Systems Architecture* . Birmingham, UK: Packt Publishing.

León Callupe, J. D. (2021). *Diseño e Implementación de un PLC basado en Raspberry Pi & Nodered para aplicaciones industriales IoT*. Lima, Perú: Tesis.

Rafiquzzman, M. (2018). *Microcontroller Tehory and Aplications with the PIC18F*. Pomona, California: Jhon Wiley & Sons. Inc.

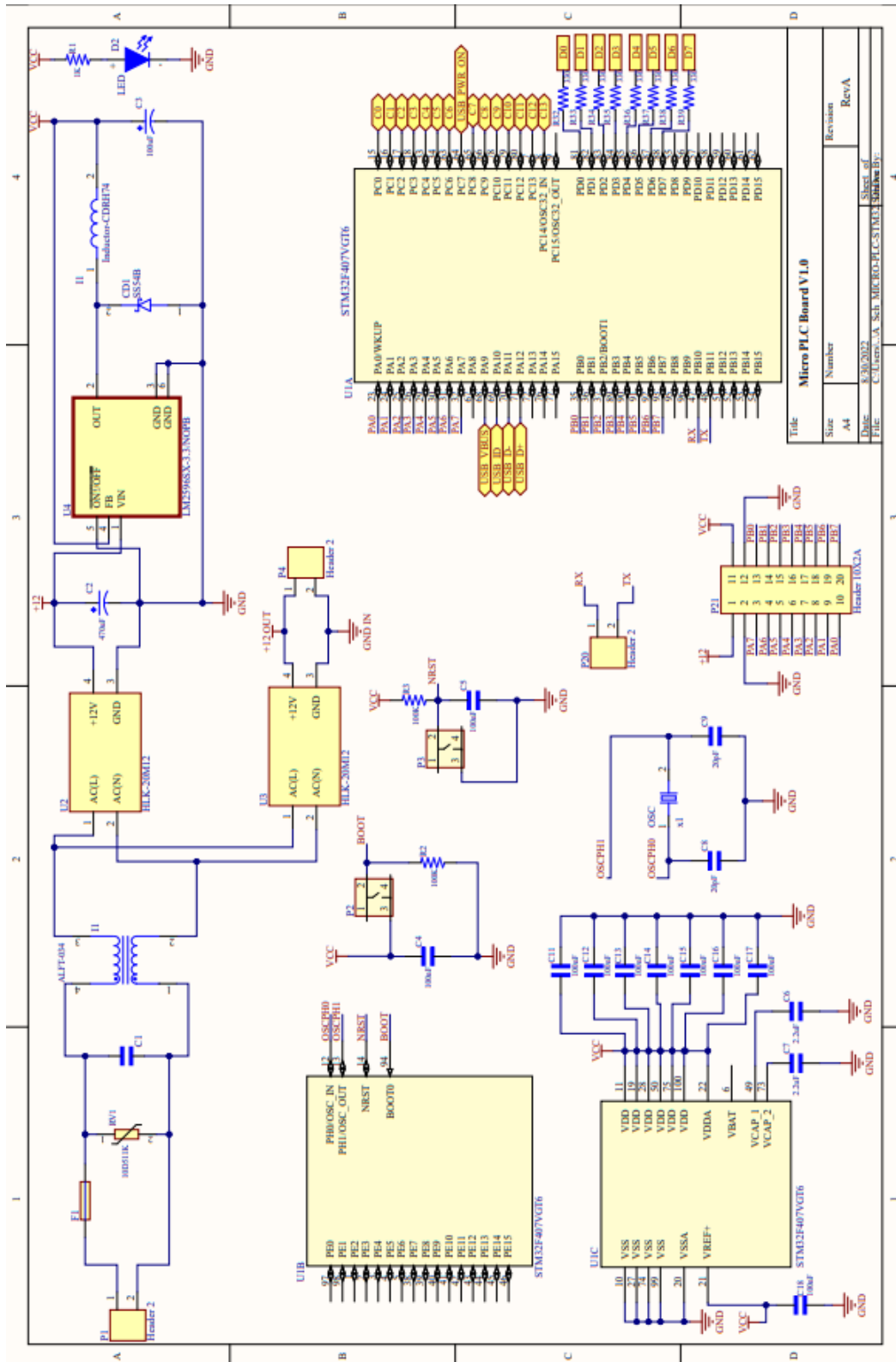
Valencia, F. C. (2021). *Diseño y construcción de un PLC didáctico*. Veracruz, México: Tesis.

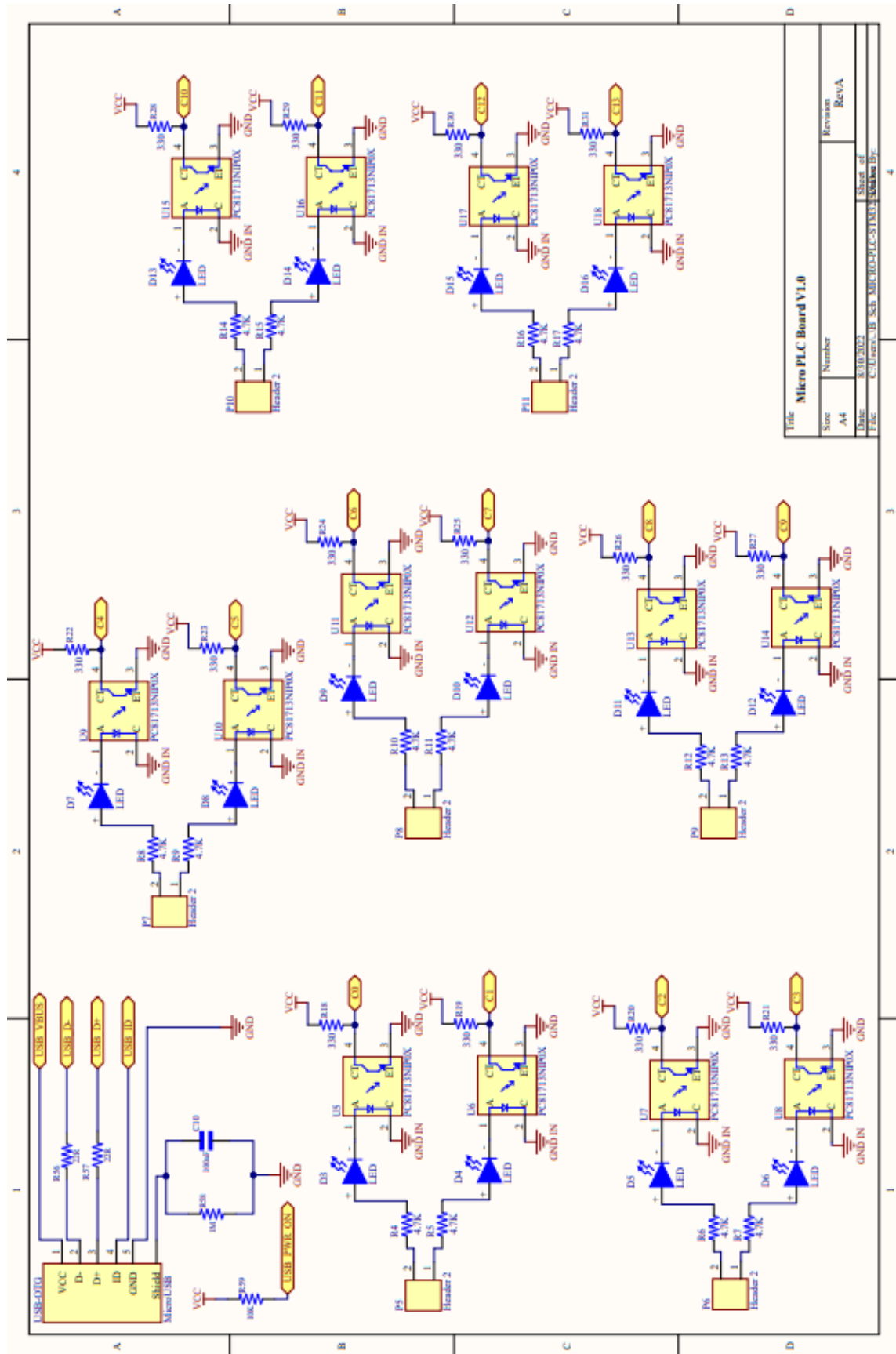
Vanessa Romero Segovia, A. T. (2013). *History of Control, History of PLC and DCS*.

Yiu, J. (2014). *The definitive guide to ARM Cortex-M3 and Cortex M4 processors* . Kidlington, UK: Newnes.

# ANEXOS

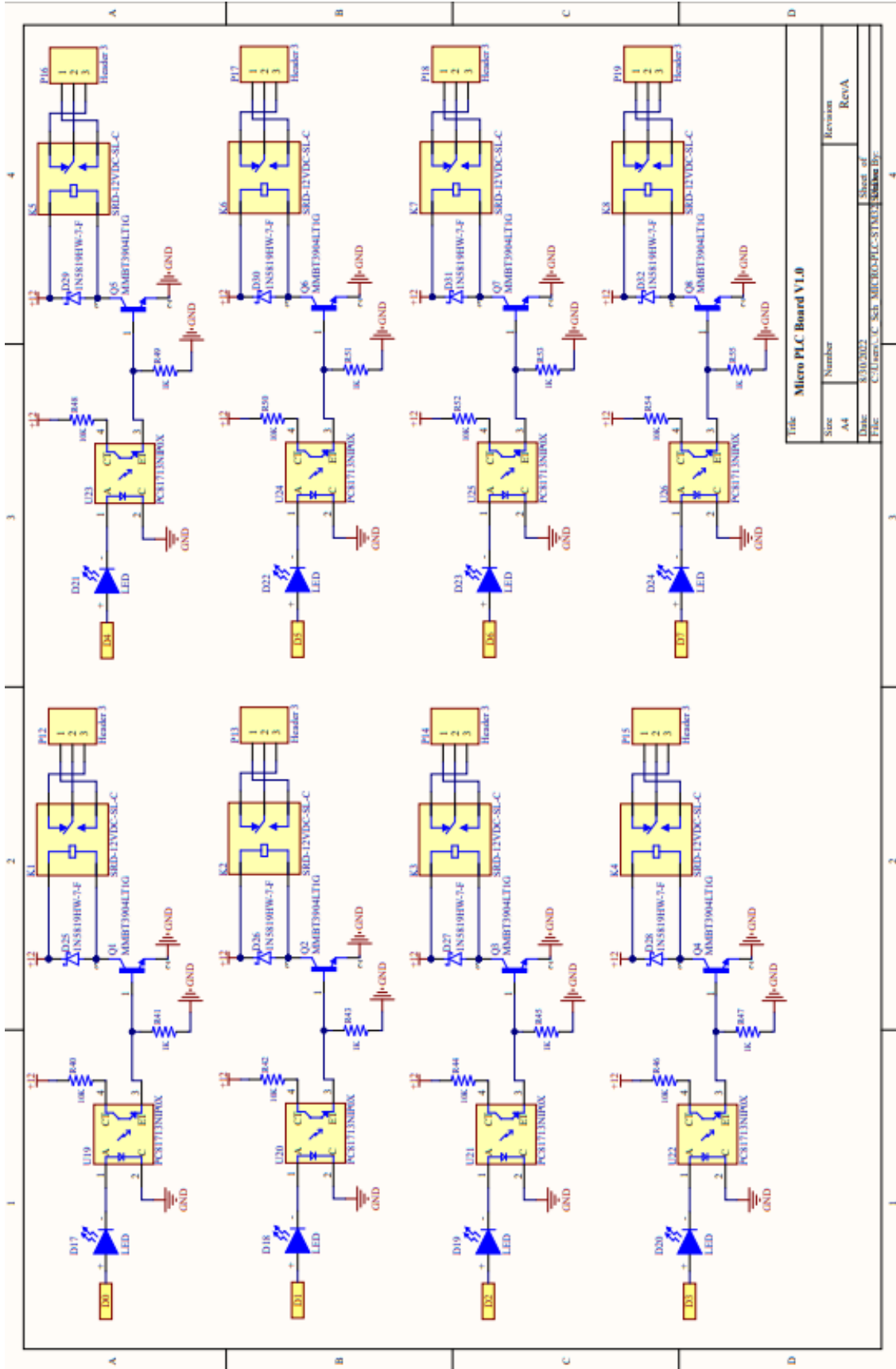
## Anexo 1. Diagramas esquemáticos





Title		Micro PLC Board V1.0	
Size	Number	Revision	RevA
A4			
Date	File		Sheet of
8/30/2022	C:\User\CJB\Sch\MICRO-PLC-STAGE\04khw By		4





Title: <b>Micro PLC Board V1.0</b>			
Size: A4	Number:	Revision: RevA	
Date: 8/30/2022	Sheet of 1		Sheet of 4
File: C:\Users\...\.C_Sch_MicroPLC-SYMLOG.dwg			

## Anexo 2. Cotización de componentes electrónicos.



Tel.: (222) 6 21 57 65  
 WhatsApp: 2226215765  
 email: contacto@intesc.mx

Valido por 30 días

### COTIZACIÓN IN22161

Fecha (DD/MM/AAAA)
<b>22/07/2022</b>

NO. RENIECYT:

**1801942**

NO. SICOP

**077125**

COMPAÑÍA		CONTACTO			
		Jose Enrique Fierro Lora			
		Correo: <a href="mailto:im191253@itsatlixco.edu.mx">im191253@itsatlixco.edu.mx</a>			
PARTIDA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	T. DE ENTREGA	COSTO UNITARIO	TOTAL
1	CAPPOL474V400	2	2 Semanas	\$7.76	\$15.52
2	CAPELE477V16	2	Inmediata	\$5.60	\$11.20
3	CAPELE107V50	2	Inmediata	\$4.74	\$9.48
4	CL10B104KB8NNNC	22	Inmediata	\$0.86	\$18.92
5	CL10A225KP8NNNC	4	Inmediata	\$1.29	\$5.16
6	CL10C200JB8NNNC	4	Inmediata	\$0.86	\$3.44
7	SS54B	2	Inmediata	\$4.31	\$8.62
8	GBGM-C191TGKT-5A	46	Inmediata	\$0.86	\$39.56
9	1N5819HW-7-F	16	Inmediata	\$1.29	\$20.64
10	FUHOL6X30	2	2 Semanas	\$2.59	\$5.18
11	ALFT-034	2	Inmediata	\$30.17	\$60.34
12	CDRH74	2	Inmediata	\$12.93	\$25.86
13	SRD-12VDC-SL-C	16	2 Semanas	\$10.34	\$165.44
14	CLEMAX2	20	Inmediata	\$3.02	\$60.40
15	TL3301NF260QG	4	Inmediata	\$1.72	\$6.88
16	CLEMAX3	16	Inmediata	\$5.17	\$82.72
17	61304021121	1	Inmediata	\$5.17	\$5.17
18	MMBT3904LT1G	16	Inmediata	\$2.59	\$41.44
19	0603WAF1001T5E	18	Inmediata	\$0.23	\$4.14
20	0603WAF1003T5E	4	Inmediata	\$0.23	\$0.92
21	0603WAF4701T5E	28	Inmediata	\$0.21	\$5.88
22	0603WAF3300T5E	44	Inmediata	\$0.21	\$9.24
23	0603WAF1002T5E	18	Inmediata	\$0.23	\$4.14
24	0603WAF220JT5E	4	2 Semanas	\$0.23	\$0.92
25	0603WAF1004T5E	2	Inmediata	\$0.23	\$0.46
26	10D511K	2	2 Semanas	\$17.24	\$34.48



**Intesc**  
electrónica & embebidos

Tel.: (222) 6 21 57 65  
WhatsApp: 2226215765  
email: contacto@intesc.mx

Valido por 30 días

**COTIZACIÓN IN22161**

Fecha (DD/MM/AAAA)
<b>22/07/2022</b>

NO. RENIECYT:  
**1801942**

NO. SICOP  
**077125**

COMPAÑÍA		CONTACTO			
		Jose Enrique Fierro Lora			
		Correo: <a href="mailto:im191253@itsatlixco.edu.mx">im191253@itsatlixco.edu.mx</a>			
27	STM32F407VGT6	2	3 Semanas	\$520.00	\$1,040.00
28	HLK20M12	4	2 Semanas	\$193.96	\$775.84
29	LM2596SX-3.3/NOPB	2	2 Semanas	\$30.17	\$60.34
30	PC817X3CSP9F	44	2 Semanas	\$3.45	\$151.80
31	USB_MICRO_THT	2	Inmediata	\$4.31	\$8.62
32	5032-8MHZ	2	Inmediata	\$6.03	\$12.06

**NOTAS:**

**Ordenes de compra dirigidas a:**

Carlos García Lucero  
Av. San Ignacio 1834-L3  
Col. Jardines de San Manuel  
C.P. 72570. Puebla Puebla  
RFC GALC8309097A7

**Observaciones:**

100% Anticipo

**Precios en Moneda Nacional**

En caso de cancelación una vez emitida la OC no se reembolsará el Anticipo

Subtotal \$2,694.81

IVA \$431.17

**Total \$3,125.98**

ATTE.

Carlos García Lucero

### Anexo 3. Cotización de fabricación y ensamble.



Tel.: (222) 6 21 57 65  
 WhatsApp: 2226215765  
 email: contacto@intesc.mx

Valido por 15 días

### COTIZACIÓN IN22157

Fecha (DD/MM/AAAA)
<b>21/07/2022</b>

NO. RENIECYT:  
**1801942**

NO. SICOP  
**077125**

COMPAÑÍA		CONTACTO			
		Jose Enrique Fierro Lora			
		Correo: <a href="mailto:im191253@itsatlixco.edu.mx">im191253@itsatlixco.edu.mx</a>			
PARTIDA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	T. DE ENTREGA	COSTO UNITARIO	TOTAL
1	Fabricación de PCB: * Tamaño: 170 x 120mm * Capas: 2 * Grosor de Sustrato: 1.6mm * Cobre: 1oz * Mascarilla antisoldante: verde * Acabado HASL-LEAD * Costo para 5 piezas	1	2 Semanas	\$1,992.00	\$1,992.00
2	Ensamble de PCB: * Ensamble: 1 cara * Componentes originales: 32 * Componentes SMD: 145 * Componentes THT: 33 * No incluye componentes	2	3 días (A partir de la recepción de componentes)	\$450.00	\$900.00

**NOTAS:**

**Ordenes de compra dirigidas a:**

Carlos García Lucero  
 Av. San Ignacio 1834-L3  
 Col. Jardines de San Manuel  
 C.P. 72570. Puebla Puebla  
 RFC GALC8309097A7

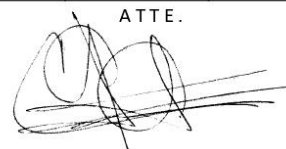
**Observaciones:**

100% Anticipo

**Precios en Moneda Nacional**

En caso de cancelación una vez emitida la OC no se reembolsará el Anticipo

Subtotal	\$1,992.00
IVA	\$318.72
<b>Total</b>	<b>\$2,310.72</b>

A T T E .  
  
 Carlos García Lucero