



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Grado en ingeniería en sistemas industriales

TRABAJO FIN DE GRADO

**“Diseño y Desarrollo de un Micro PLC
basado en ESP32 para aplicaciones de IoT.”**

Alumno: D.Saúl Raboso Molina

Director: D.Diego Ortega Sanz

FEBRERO 2025

TÍTULO: Diseño y Desarrollo de un Micro PLC basado en ESP32 para aplicaciones de IoT.

AUTOR: Saúl Raboso Molina

DIRECTOR DEL PROYECTO: Diego Ortega Sanz.

FECHA: 27 de Febrero de 2024

Resumen

En el siguiente trabajo veremos el diseño y desarrollo de un micro PLC basado en un microcontrolador ESP32, para tareas de automatización domótica, mediante protocolos como MQTT, también veremos el desarrollo de un prototipo funcional mediante una PCB de prototipos y sus pruebas funcionales para la validación del sistema. Finalmente se realizará un plan de negocio preliminar analizando costes y beneficios generados por las ventas, además de calcular el punto de equilibrio operativo

Abstract

In the following document we will see the design and development of a micro PLC based on the microcontroller ESP32, for domotic automation, using protocols as MQTT, we will also see the development of a prototype using a prototype PCB and the validation job, finally a preliminary business plan will be developed analyzing the operating cost and benefits generated, and also we will calculate the operating point of equilibrium.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1 Contexto y motivación.....	9
1.2 Objetivos del proyecto.....	9
1.3 Alcance y limitaciones.....	9
1.4 Estructura del documento.....	9
Capítulo 2. Marco Teórico.....	10
2.1 Internet de las Cosas (IoT).....	10
2.1.1 Evolución y contexto del IoT.....	10
2.1.2 Características y arquitectura del IoT.....	11
2.1.3 Aplicaciones del IoT.....	14
2.2 Protocolos y estándares IoT.....	15
2.3 Controladores Lógicos Programables (PLC).....	18
2.3.1 Estructura y funcionamiento básico de un PLC.....	20
2.3.2 Programación de PLCs.....	22
2.3.3 Configuraciones de PLCs.....	24
2.4 Arquitectura y características del ESP32.....	25
Capítulo 3. Estado del arte.....	28
3.1 Micro PLCs.....	28
3.2 Principales plataformas de desarrollo.....	29
3.3 Antecedentes.....	34
3.3.1 Arduino OPTA.....	34
3.3.2 Siemens LOGO!.....	35
3.3.3 Industrial Shields ESP32.....	35
3.3.4 Industrial Shields RaspberryPi.....	35
Capítulo 4. Estudio de necesidades y normativa aplicable.....	37
4.1 Necesidades funcionales.....	37
4.2 Necesidades del usuario.....	37
4.3 Necesidades de producción.....	38
4.4 Normativa aplicable al diseño electrónico.....	38
4.5 Normativa europea aplicable a productos electrónicos.....	38
Capítulo 5. Soluciones alternativas y solución adoptada.....	40
5.1 Microcontrolador.....	40
5.2 Alimentación.....	42
5.3 USB-UART.....	43
5.4 Bloque de entradas digitales.....	44
5.5 Bloque de Salidas.....	44

5.6 Comunicación Ethernet.....	45
Capítulo 6. Desarrollo de esquemático electrónico y PCB	46
6.1 Desarrollo del esquemático electrónico.....	46
6.1.1 Circuito de alimentación.....	46
6.1.2 Bridge USB_UART.....	51
6.1.3 ESP32-S3-Wroom-1-N16.....	54
6.1.4 Circuito de entradas digitales.....	55
6.1.5 Circuito de salidas digitales.....	57
6.1.6 Módulo ethernet.....	60
6.2 Desarrollo de la PCB.....	62
6.2.1 Circuito de alimentación.....	64
6.2.2 Bridge USB_UART.....	69
6.2.3 ESP32-S3-Wroom-1-N16.....	70
6.2.4 Circuito de entradas y salidas.....	71
6.2.5 Módulo ethernet.....	73
Capítulo 7. Diseño y fabricación de un prototipo funcional e integración.....	75
6.1 ESP32.....	76
6.2 Rediseño del circuito de entradas.....	76
6.3 Rediseño del circuito de salidas.....	78
6.4 Rediseño del bloque de alimentación.....	79
6.5 Servidor IoT.....	80
6.6 Pruebas de Validación.....	85
6.7 Montaje del prototipo.....	90
6.8 Pruebas de validación.....	95
Capítulo 8. Plan de negocio.....	97
8.1 Resumen ejecutivo.....	97
8.2 Descripción del producto.....	97
8.3. Análisis del mercado y la competencia.....	98
8.4 Plan de costes y ventas.....	100
Bibliografía.....	113

Índice de Figuras

Figura 1-1. Flujo de operación básico de una red IoT.....	12
Figura 1-2. Arquitectura básica de una red IoT.....	13
Figura 1-3. Aplicaciones del IoT.....	14
Figura 2-3. Alcance y ancho de banda de protocolos IoT.....	15
Figura 2-3. Modelo OSI y protocolos.....	16
Figura 2-1. Modicon 084. Fuente.....	18
Figura 2-2. Estructura de la unidad de control de un PLC.....	19
Figura 2-3. Flujo de operación de un PLC básico.....	20
Figura 2-4. Programación ladder.....	21
Figura 2-5. Programación con diagrama de bloques.....	22
Figura 2-6. Programación en Grafcet.....	23
Figura 2-7. Arquitectura del ESP32-S3.....	24
Figura 2-3. PCB Relé inteligente Shelly 1.....	26
Tabla 1. Comparativa de Microcontroladores.....	31

Índice de Tablas

Figura 1-1. Flujo de operación básico de una red IoT.....	13
Figura 1-2. Arquitectura básica de una red IoT.....	14
Figura 1-3. Aplicaciones del IoT.....	15
Figura 2-3. Alcance y ancho de banda de protocolos IoT.....	16
Figura 2-3. Modelo OSI y protocolos.....	17
Figura 2-1. Modicon 084. Fuente.....	19
Figura 2-2. Estructura de la unidad de control de un PLC.....	20
Figura 2-3. Flujo de operación de un PLC básico.....	21
Figura 2-4. Programación ladder.....	22
Figura 2-5. Programación con diagrama de bloques.....	23
Figura 2-6. Programación en Grafcet.....	24
Figura 2-7. Arquitectura del ESP32-S3.....	25
Figura 2-3. PCB Relé inteligente Shelly 1.....	27
Tabla 1. Comparativa de Microcontroladores.....	32

Capítulo 1. Introducción

1.1 Contexto y motivación

La idea del proyecto surge de la falta de soluciones de código abierto, en el campo de la domótica, este campo principalmente dominado por la domótica de sistemas propietarios presentan un costo extremadamente alto, haciendo inaccesible la comodidad del hogar automatizado, con esto en mente se decidió desarrollar un producto con un coste muy inferior a los sistemas propietarios haciendo accesible la automatización del hogar a una gran parte del público que no se puede permitir costes elevados.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto es el diseño y desarrollo de un microPLC basado en ESP32 para aplicaciones de IoT que permita controlarlo remotamente para automatización de procesos domésticos como el control de luminarias.

Objetivos específicos

- **Diseño del Hardware:** incluyendo la selección de componentes y el diseño de la tarjeta electrónica.
- **Diseño y desarrollo de un prototipo funcional:** Adaptación de la tarjeta diseñada para comprobar el funcionamiento del sistema.
- **Validación del sistema:** Realización de pruebas para validar los distintos circuitos del sistema.
- **Validación de compatibilidad con protocolo MQTT:** Realización de pruebas del sistema con comunicación por MQTT para controlarlo de manera remota.

1.3 Alcance y limitaciones

El proyecto abarca el diseño de una PCB desde la selección de componentes, diseño del esquemático electrónico y diseño de la tarjeta, y las pruebas de validación de las mismas.

En cuanto a las limitaciones del proyecto no se desarrollará la PCB diseñada, debido a la baja experiencia en el diseño de las mismas, sin embargo se verá sustituida por una placa prototipo para la realización de las pruebas funcionales.

1.4 Estructura del documento

El documento está estructurado de la siguiente manera:

1. Marco teórico en el cual se explica el IoT y los PLCs.
2. Estado del arte, en este apartado se explican los diferentes microcontroladores más utilizados en la electrónica y principales micro PLCs presentes en el mercado.
3. Un estudio de necesidades que debemos cubrir mediante el producto diseñado.
4. Estudio de soluciones, en este apartado se habla de las distintas soluciones sopesadas en el diseño y la solución adoptada finalmente.
5. Desarrollo del esquemático electrónico y PCB, en este apartado se habla del diseño realizado.
6. Diseño y fabricación de un prototipo funcional y pruebas de validación, en este apartado veremos las diferentes pruebas realizadas y el desarrollo de un prototipo funcional
7. Plan de negocio, en el que veremos un pequeño estudio de mercado y plan de costes y ventas preliminar.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Internet de las Cosas (IoT)

En la actualidad, debido al gran avance en las tecnologías, el mundo ha cambiado a un modelo dependiente de la tecnología y con su desarrollo se abrió paso a múltiples ámbitos de nuestra vida cotidiana como el sector médico, la educación o la industria.

Según explica la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en el documento Y.2060, El internet de los objetos se puede definir como: “Infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperabilidad de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) presentes y futuras”.

Esta definición se puede simplificar en lo siguiente, el IoT consiste en la interconexión de dispositivos físicos y virtuales a través de internet que nos permite recopilar, intercambiar y analizar datos.

2.1.1 Evolución y contexto del IoT

La primera aparición del concepto de una red de dispositivos inteligentes surgió en 1982, cuando una máquina de Coca-Cola modificada se convirtió en el primer electrodoméstico en tener acceso a internet.

En 1999 se popularizó el término de Internet de las Cosas o IoT. En este año en el Instituto Tecnológico de Massachusetts se formó el Auto-ID Centre, cuyo objetivo era encontrar el sucesor del código de barras.

Durante una conversación de dos integrantes del grupo se discutió el RFID o Identificación por Radiofrecuencia, un sistema de almacenamiento electrónico y recuperación de datos remotos mediante etiquetas.

Con la necesidad de un bajo costo y almacenar gran cantidad de datos con el fin de poder identificar cualquier objeto de forma única, no tardó en surgir la idea de almacenar estos datos en internet, surgiendo así el término IoT.

Para otros grupos como el Internet Business Solutions Group (IBSG) de Cisco, el IoT es el momento en el tiempo a partir del cual hay conectados a internet más dispositivos que personas. Este hito ocurre en algún momento entre el año 2008 y 2009, debido al crecimiento de los Smartphones y Tablets elevaron el número de dispositivos conectados alcanzando la cifra de doce mil millones y medio en el año 2010.

2.1.2 Características y arquitectura del IoT

Las características fundamentales del IoT se presentan a continuación:

- **Interoperabilidad:** Esta es la característica más destacable del IoT, debido a que le permite el acceso a la infraestructura mundial de la información.
- **Servicios relacionados con objetos:** IoT nos ofrece servicios para objetos dentro de las restricciones de los mismos como la protección a la privacidad.
- **Heterogeneidad:** Los dispositivos IoT generalmente están basados en distintas tecnologías de hardware y redes, y pueden operar conjuntamente.
- **Cambios dinámicos:** El estado de los dispositivos, su contexto y el número de dispositivos del sistema varían dinámicamente.
- **Escalabilidad:** El número de dispositivos IoT conectados va a incrementarse en el futuro y el porcentaje de comunicación requerido será mucho mayor que la comunicación humana, haciendo que la gestión de los datos generados, su interpretación y manipulación sean esenciales.

El único requisito obligatorio que debe cumplir cualquier dispositivo IoT es disponer de capacidades de comunicación. Además de los requisitos básicos, existen los siguientes requisitos de alto nivel:

- **Conectividad basada en la identificación:** Para la interconexión de un objeto, la red IoT necesita que el objeto tenga un identificador.
- **Compatibilidad:** El posible uso de sistemas heterogéneos, generan la necesidad de garantizar la compatibilidad para distintos servicios.
- **Redes automáticas:** Las redes IoT deben soportar redes automáticas, con el fin de adaptarse a diferentes dominios de aplicación, contextos de comunicación, etcétera.
- **Capacidades basadas en la ubicación:** En determinados casos los servicios y las comunicaciones en relación con los objetos dependerá de la ubicación de los mismos y el usuario. Su uso puede estar regulado por leyes o normativas.
- **Seguridad:** Todo objeto que esté conectado a la red IoT conlleva amenazas de seguridad, por ello es esencial mantener requisitos de seguridad al integrar los dispositivos a la red manteniendo la confidencialidad, integridad y autenticidad de los datos.
- **Protección de la privacidad:** Los objetos conectados a la red IoT contienen información sensible sobre sus propietarios o usuarios, estos datos deben ser protegidos por la red durante la transmisión, almacenamiento y procesamiento.
- **Autoconfiguración:** Debe soportar la autoconfiguración, permitiendo la integración y cooperación de objetos.

A partir de las características descritas, podemos asumir que un sistema IoT básico debe seguir el siguiente flujo de operación.

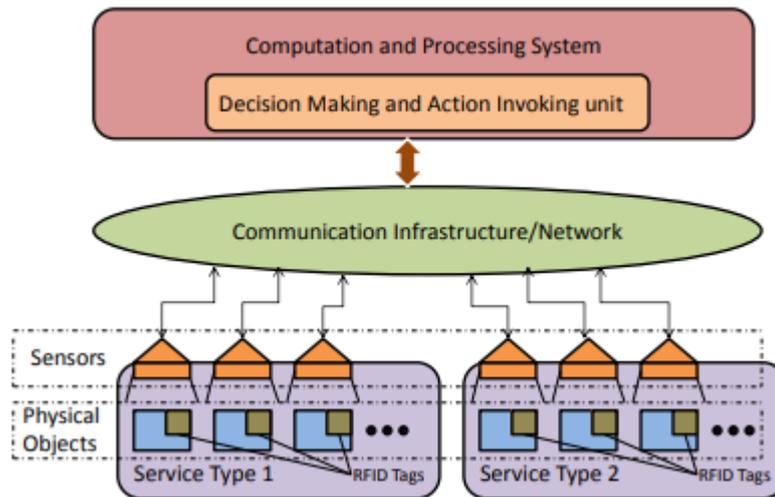


Figura 1. Flujo de operación básico de una red IoT

El flujo de trabajo de la red IoT puede ser descrito de la siguiente manera:

- **Detección, identificación y comunicación:** En función del tipo de sensor con el que esté equipado el objeto físico podemos medir una gran variedad de magnitudes, incluyendo una combinación de sensores podemos crear un servicio inteligente como una estación meteorológica.
- **Procesado y actuación:** La información obtenida por los objetos se transmite a través de la red a un sistema capaz de procesar los datos obtenidos y determina la acción que se debe llevar a cabo.

La arquitectura básica de una red IoT consta principalmente de 3 capas, estas son las capas de aplicación, red y percepción, estas tres capas forman la configuración más simple de una red IoT, sin embargo, debido a la gran evolución que estas redes presentan su arquitectura básica evolucionó a las 5 capas mostradas en la Figura 1-2.

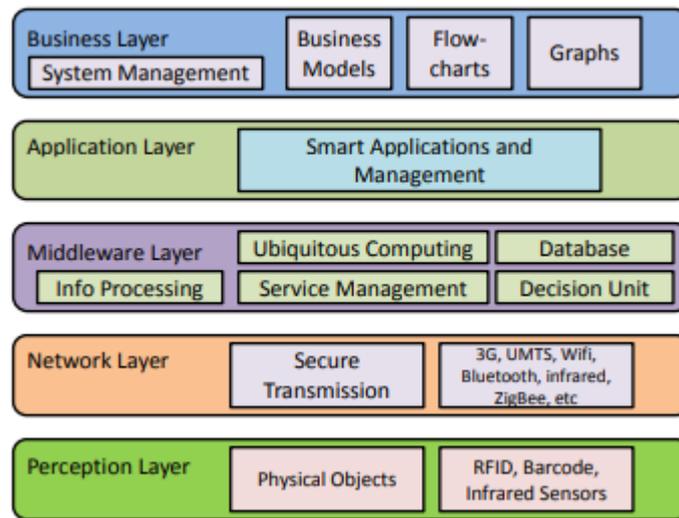


Figura 2. Arquitectura básica de una red IoT.

1. **Capa de percepción:** También conocida como la capa de dispositivos, esta se encarga de lidiar con la identificación y recolección de información específica de los objetos y sus sensores.
2. **Capa de red:** También conocida como capa de transmisión, se encarga de transmitir de forma segura la información de los sensores de los objetos al sistema de procesamiento de información.
3. **Capa de procesamiento:** Los sensores que conforman la red, utilizan servicios específicos y solo se comunican con dispositivos que utilicen los mismos servicios, esta capa se encarga del manejo de los servicios
4. **Capa de aplicación:** La capa de aplicación, tiene la función de desarrollo de aplicaciones que utilizan los datos recogidos por la capa de procesamiento.
5. **Capa de negocio:** La capa de negocio, es la capa encargada de administrar el sistema IoT incluyendo la aplicación y los servicios, Esta capa genera gráficas y diagramas con los datos obtenidos de la capa de procesamiento.

2.1.3 Aplicaciones del IoT

El IoT está presente en un gran número de campos, debido a su gran escalabilidad y los pocos recursos necesarios podemos encontrarlos en campos como la domótica, la industria o la medicina.

Las aplicaciones del sistema IoT deben presentar alguna de las siguientes capacidades:

- 1) **Localización o información de la localización:** El sistema recoge datos sobre la localización de los dispositivos, estos datos sobre la localización se pueden recoger mediante GPS, RFID, etcétera. Esta información es esencial para las aplicaciones.
 - a) **Seguimiento de sistemas en movimiento:** Permite monitorizar el estado de objetos dentro de unas instalaciones.
 - b) **Gestión de flota:** El gestor de la flota, puede gestionar los vehículos que la integran, gracias a los datos de la localización recogidos.
 - c) **Sistema de información de tráfico:** Gracias a los datos recogidos de los sensores de los vehículos que integran la flota podemos gestionar las rutas de estos en función de los datos del tráfico de las zonas obtenidos.
- 2) **Sensorización ambiental:** Los sistemas IoT pueden recoger datos medioambientales mediante los sensores de los objetos que integran la red.
 - a) **Prevención de desastres naturales:** Mediante diferentes sensores que midan las características medioambientales como la humedad, temperatura. Permittiéndonos prevenir desastres naturales.
 - b) **Monitorización médica remota:** Mediante dispositivos IoT que recogen información del paciente, como un urinómetro que mide el volumen de orina y su color en pacientes críticos en la UCI.
- 3) **Control remoto:** Las aplicaciones de IoT nos permiten el control remoto de dispositivos conectados, en función de la información recolectada y comandos de aplicación.
 - a) **Domótica:** Permite el control remoto de electrodomésticos, a partir de aplicaciones de IoT como Home Assistant.
 - b) **Recuperación de desastres:** Los usuarios pueden ejecutar tareas de recuperación de desastres para minimizar las pérdidas.
- 4) **Ad-Hoc Networking:** El sistema debe contar con un software rápidamente auto organizable y capaz de trabajar con distintos servicios.

2.2 Protocolos y estándares IoT.

Dentro del internet de las cosas existen diferentes protocolos de comunicación, muchos de ellos son tecnologías bien conocidas como el WiFi y Bluetooth, también puedes encontrar otras redes alternativas como LoRaWAN.

A la hora de seleccionar un protocolo debemos valorar diferentes características de los protocolos como su alcance, ancho de banda, consumo y seguridad.

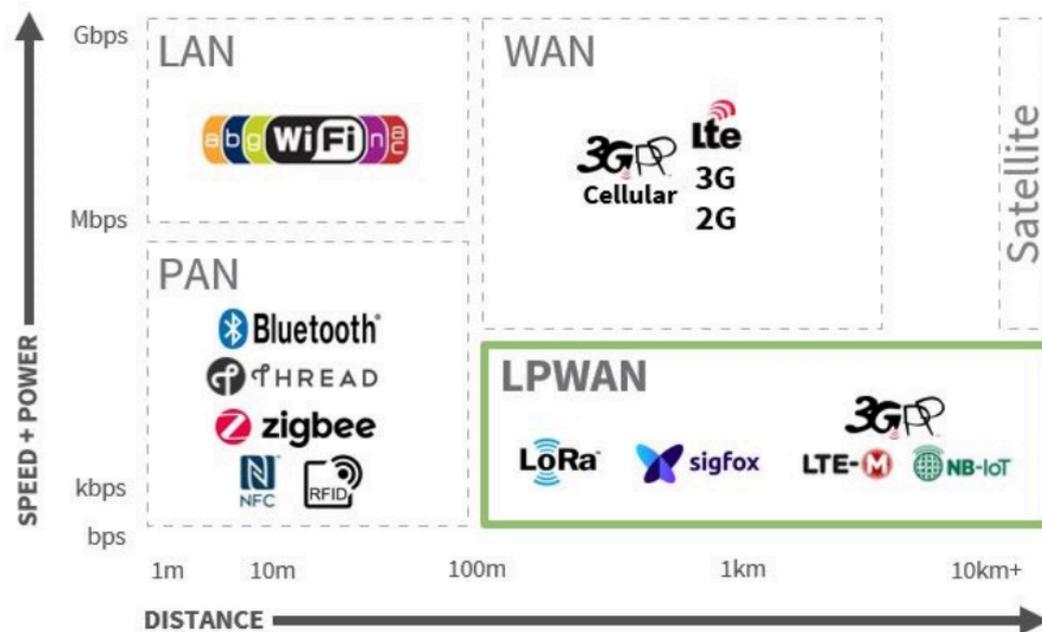


Figura 3. Alcance y ancho de banda de protocolos IoT.

Los diferentes protocolos IoT están relacionados con capas específicas de la arquitectura, para explicarlos utilizaremos el modelo OSI que proporciona una visión de las distintas capas que envían o reciben datos dentro del sistema.

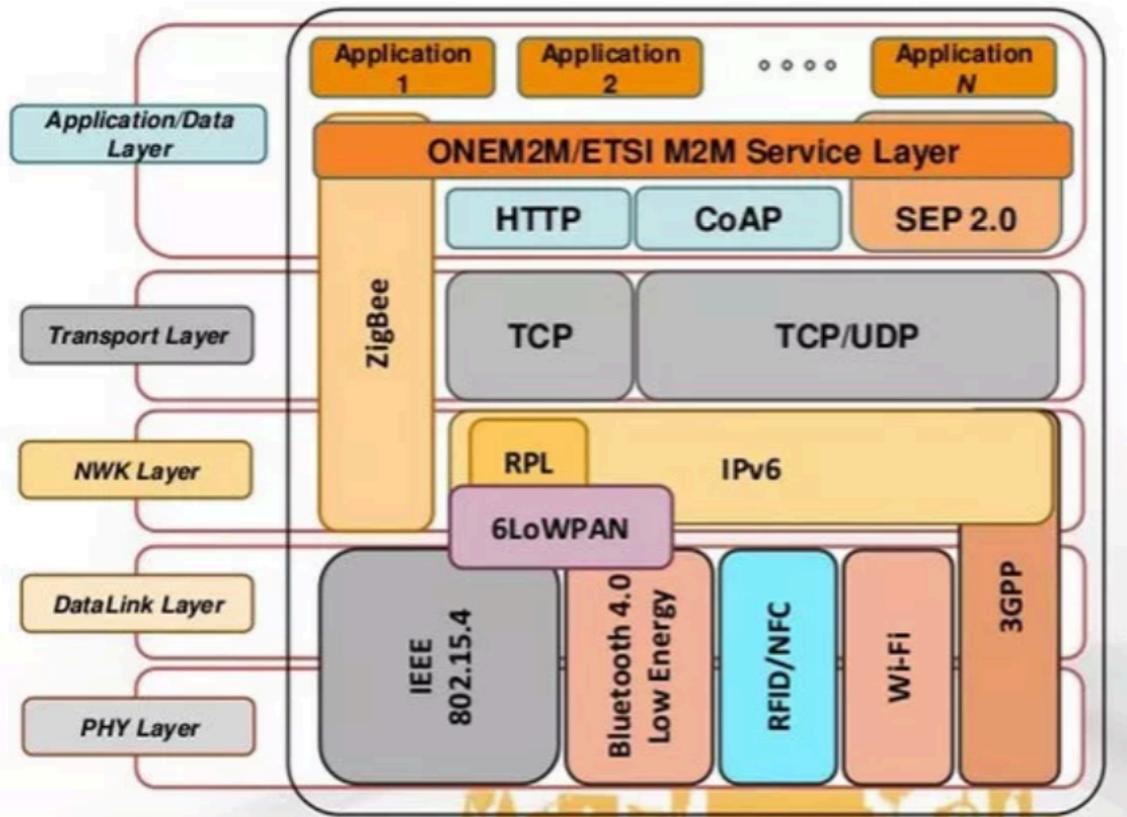


Figura 4. Modelo OSI y protocolos.

A continuación comentaremos la función de cada capa y los protocolos relacionados con ellas.

- 1. Capa de aplicación:** Tiene la función de interfaz entre el dispositivo y usuario.
 - **MQTT:** Es un protocolo de mensajería utilizado para comunicaciones con un bajo ancho de banda en ubicaciones remotas, emplea un modelo de publicador-subscriptor.
 - **AMQP:** Utilizado para crear interoperabilidad de sistemas creando mensajes estandarizados.
 - **CoAP:** Empleado en ubicaciones con un ancho de banda limitado y dispositivos de bajas capacidades.
- 2. Capa de transporte:** Encargada de habilitar y asegurar la comunicación de los datos entre las capas.
 - **TCP:** Ofrece comunicación de host a host.

- **UDP:** Permite la comunicación de proceso a proceso, es empleado en aplicaciones donde puede existir pérdida de datos.
- 3. **Capa de red:** Encargada de asignar un identificador a los dispositivos de la red para poder comunicarse.
 - **IPV6:** Enruta el tráfico a través de internet e identifica y ubica dispositivos.
 - **6LoWPAN:** Es una versión del protocolo anterior pero de menor potencia.
- 4. **Capa de enlace de datos:** Se encarga de transferir datos dentro del sistema.
 - **IEEE 802.15.4:** Utilizado en conexiones inalámbricas de baja potencia como Zigbee
 - **LPWAN:** Permite comunicaciones de largo alcance como LoRaWAN.
- 5. **Capa física:** Establece un canal de comunicación para conectar los dispositivos dentro del entorno.
 - **Bluetooth**
 - **Ethernet**
 - **NFC:** Utiliza campos electromagnéticos para que dos dispositivos se comuniquen a distancias muy cortas, esta tecnología se utiliza en objetos como tarjetas de crédito.
 - **RFID:** Utiliza campos electromagnéticos para leer etiquetas electrónicas y adquirir su información para su posterior identificación.
 - **Wi-Fi**

2.3 Controladores Lógicos Programables (PLC)

Los PLC o Programmable Logic Controller, también conocido en español por Controlador Lógico Programable o Autómata. Es un equipo electrónico programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar procesos industriales en tiempo real.

Estos surgieron en la década de 1960 con el propósito de reemplazar los sistemas cableados controlados por relés, interruptores y otros componentes debido al alto costo y trabajo que suponía realizar una modificación en el sistema, sumado a esto los relés son sistemas electromecánicos que cuentan con una vida útil limitada lo que requería planificar un mantenimiento para paliar todos los problemas anteriores surge la idea del PLC.

En 1968 Bedford Associates crea el Modicon 084, el primer PLC de la historia y crean una empresa con finalidad comercial para vender el nuevo PLC. Este nuevo producto cumplía las premisas de ser fácilmente programable, tener mayor vida útil que los relés, ser resistente y poca necesidad de mantenimiento cubriendo todos los puntos débiles de los sistemas de relé.



Figura 5. Modicon 084. Fuente

En la década de los 70 los PLC evolucionaron a gran ritmo con la introducción de nuevos microprocesadores y el desarrollo de sistemas de comunicación. La aparición de los buses de comunicación supuso un gran avance para la comunicación entre PLCs, sin embargo, el desarrollo de estos buses también trajo problemas pues la mayoría eran incompatibles.

En la actualidad los grandes competidores de los PLCs son los ordenadores personales debido a las mayores posibilidades que presentan, pese a ello los PLC siguen controlando el escenario industrial.

2.3.1 Estructura y funcionamiento básico de un PLC

Los PLCs están conformados por tres módulos básicos:

- 1. Módulo de alimentación:** Es el encargado de regular la tensión de alimentación, en Europa de 230V de corriente alterna con una frecuencia de 50Hz, a un nivel de 24VCC generalmente utilizado en la industria.

2. **Módulo de procesador:** Es el módulo encargado de interpretar las señales de entrada e interpretar las instrucciones de programa realizando operaciones aritméticas y lógicas.
3. **Módulo de entradas y salidas digitales:** Módulo encargado de la interconexión física con los sistemas externos al PLC, se encargan de aislar las señales de entrada y salida para proteger al módulo de procesador.

Con estos componentes se puede considerar un PLC básico, sin embargo, existen módulos adicionales que pueden ser instalados según requiera la aplicación como módulos de entradas y salidas analógicas, módulos de comunicaciones, HMIs o Human Machine Interface, etcétera.

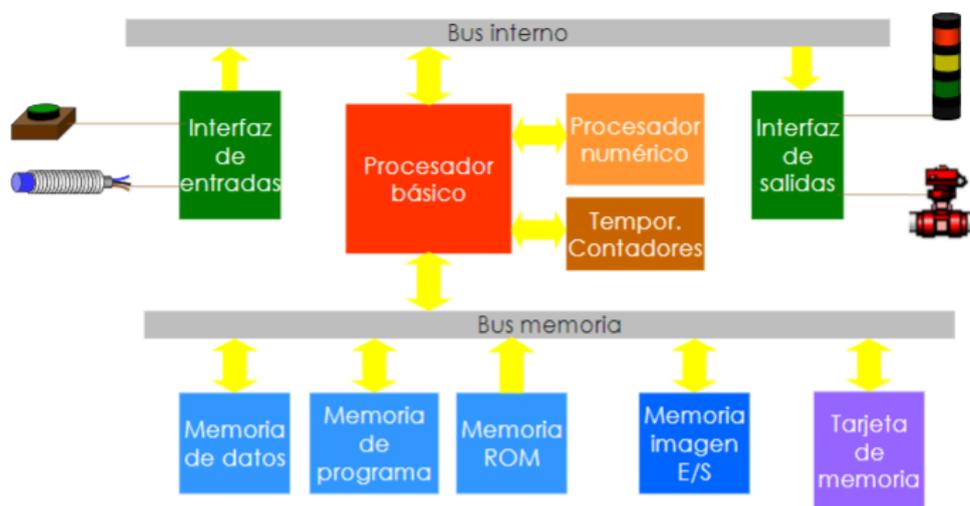


Figura 6. Estructura de la unidad de control de un PLC.

El funcionamiento básico de un PLC se puede describir mediante la figura 2-2 y 2-3.

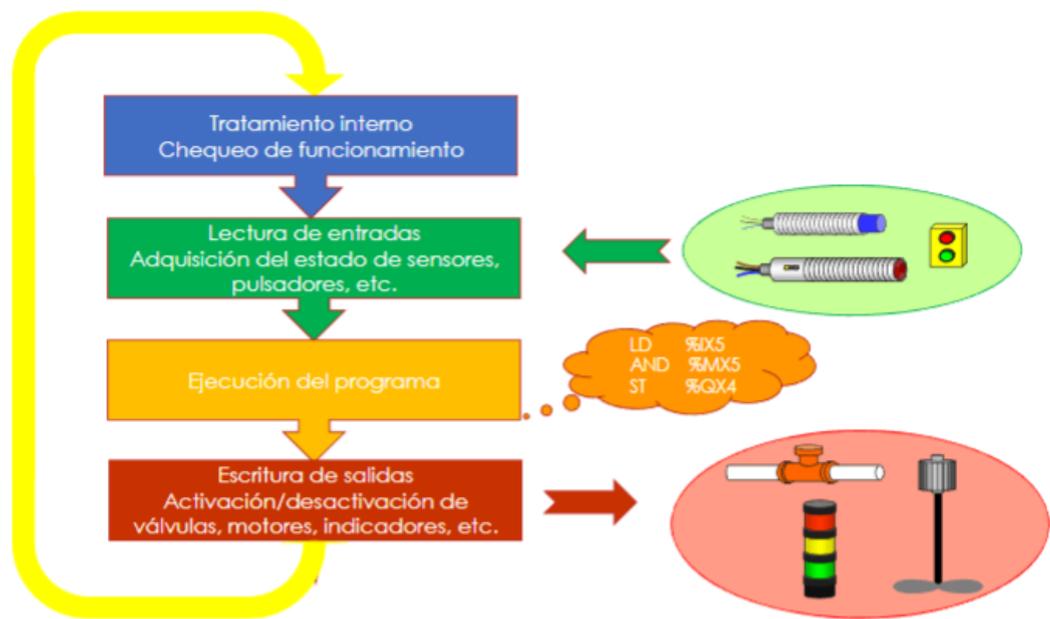


Figura 7. Flujo de operación de un PLC básico.

- 1. Lectura de las entradas:** El PLC revisa las entradas configuradas para detectar un cambio en el nivel de entrada. Cuando se produce un cambio este se transmite a través del bus interno al procesador.
- 2. Ejecución de programa:** El procesador accede a la memoria de programa y ejecuta la rutina programada y determina los niveles de las salidas.
- 3. Escritura de salidas:** Una vez ejecutado el programa se transmiten las señales de control a las salidas que se activan o desactivan en función de estas, una vez ejecutada la rutina de salidas la ejecución comienza de nuevo.

Este flujo de programa nos ayuda a comprender el funcionamiento de un PLC de ejecución continua, sin embargo este puede estar programado para ejecutarse cíclicamente, por interrupciones o por sucesos.

2.3.2 Programación de PLCs

La programación de PLCs en entornos industriales se puede hacer por medio de distintos lenguajes recogidos en el estándar IEC 61131-3.

Los lenguajes recogidos en este estándar se pueden dividir en dos bloques, lenguajes de texto o de bajo nivel y lenguajes gráficos o de alto nivel:

1. Lenguajes de texto

- **Lista de instrucciones:** Utilizado para pequeñas aplicaciones debido a su complejidad, emplea instrucciones de mando que el procesador obedece siempre que exista la parte operacional.
- **Texto estructurado:** Un lenguaje similar a la programación tradicional emplea expresiones aritméticas, condicionales y bucles para determinar el flujo del programa.

2. Lenguajes gráficos

- **Ladder:** Es el lenguaje gráfico más empleado para la programación de PLCs la mitad izquierda representa las entradas del PLC y la derecha las salidas.

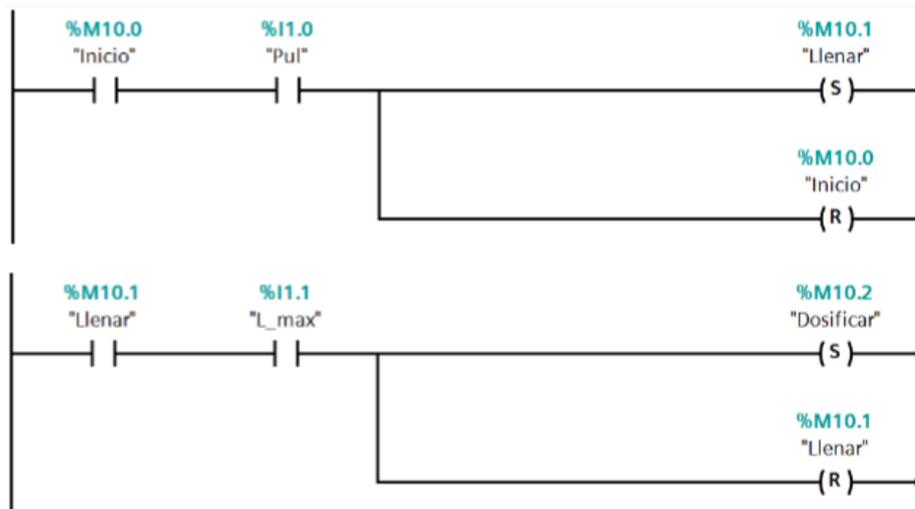


Figura 7. Programación ladder.

- **Diagrama de bloques:** Utiliza bloques de funciones que contienen las variables para la secuencia, la salida se define por la variable de entrada y la función del bloque.

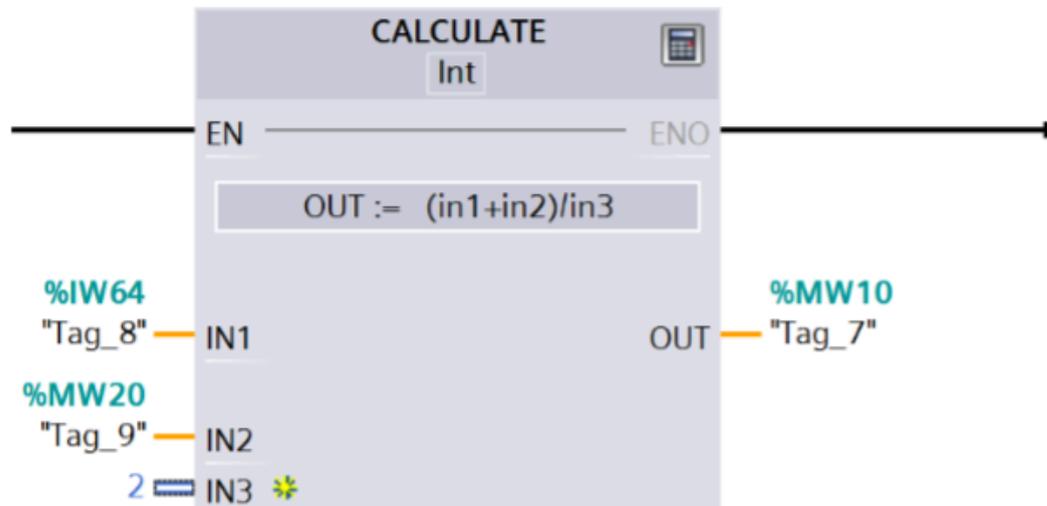


Figura 8. Programación con diagrama de bloques.

- **Grafcet:** Emplea un conjunto de etapas y transiciones interconectadas por enlaces orientados, cada etapa tiene un conjunto de acciones y cada transición tiene al menos una condición.

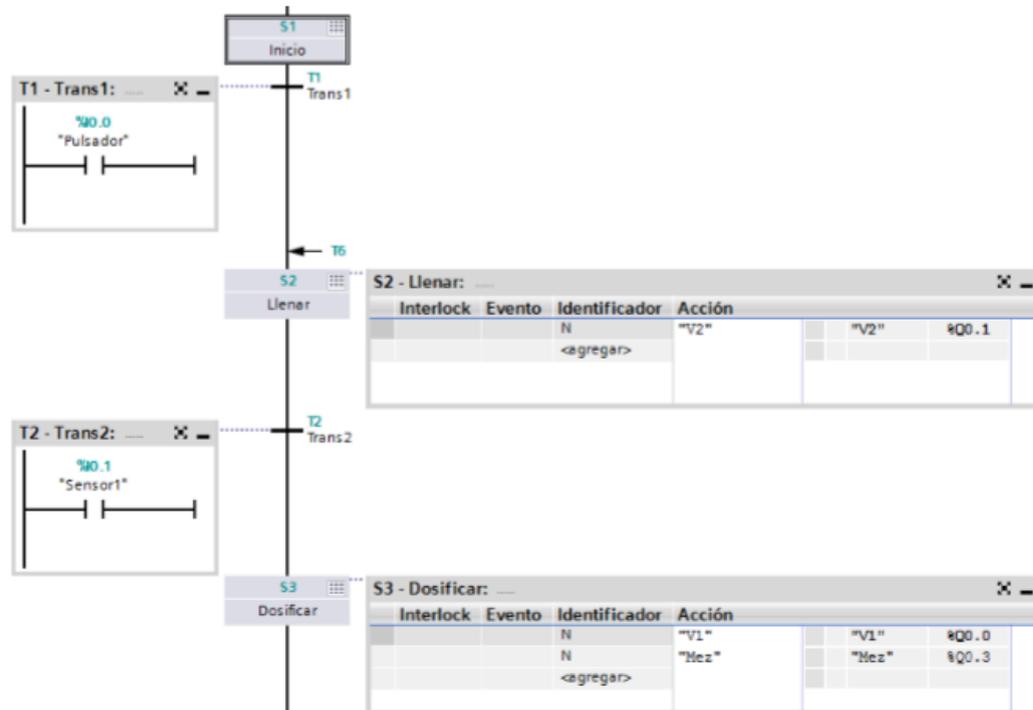


Figura 9. Programación en Grafcet.

2.3.3 Configuraciones de PLCs

Existen tres tipos de configuraciones en los PLC que varían en tamaño, cantidad de entradas y salidas y escalabilidad.

- **PLC compacto:** Estos PLCs consisten en una única unidad que integran los módulos básicos de un PLC y tienen capacidad de ampliación limitada mediante módulos de entradas y salidas adicionales
- **PLC Modular:** Como su propio nombre indica está compuesto por módulos individuales, como los módulos básicos y módulos de ampliación de entradas y salidas, pueden integrar un mayor número de módulos que los compactos, sin embargo, estarán limitados por el emplazamiento del rack.
- **Subsistemas remotos:** Similar a los PLC modulares, cuenta con capacidad de integrar módulos externos al rack comunicados a la unidad de procesamiento.

2.4 Arquitectura y características del ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y consumo diseñado por la empresa Expressif Systems, fue desarrollado como el sucesor del ESP8266 mejorando las capacidades de este último de una manera amplia.

Este microcontrolador es muy empleado por aficionados a la electrónica debido a sus grandes capacidades y bajo costo, es empleado para diversas aplicaciones como domótica, wearables y otros sistemas embebidos principalmente por su capacidad de comunicación inalámbrica integrada.

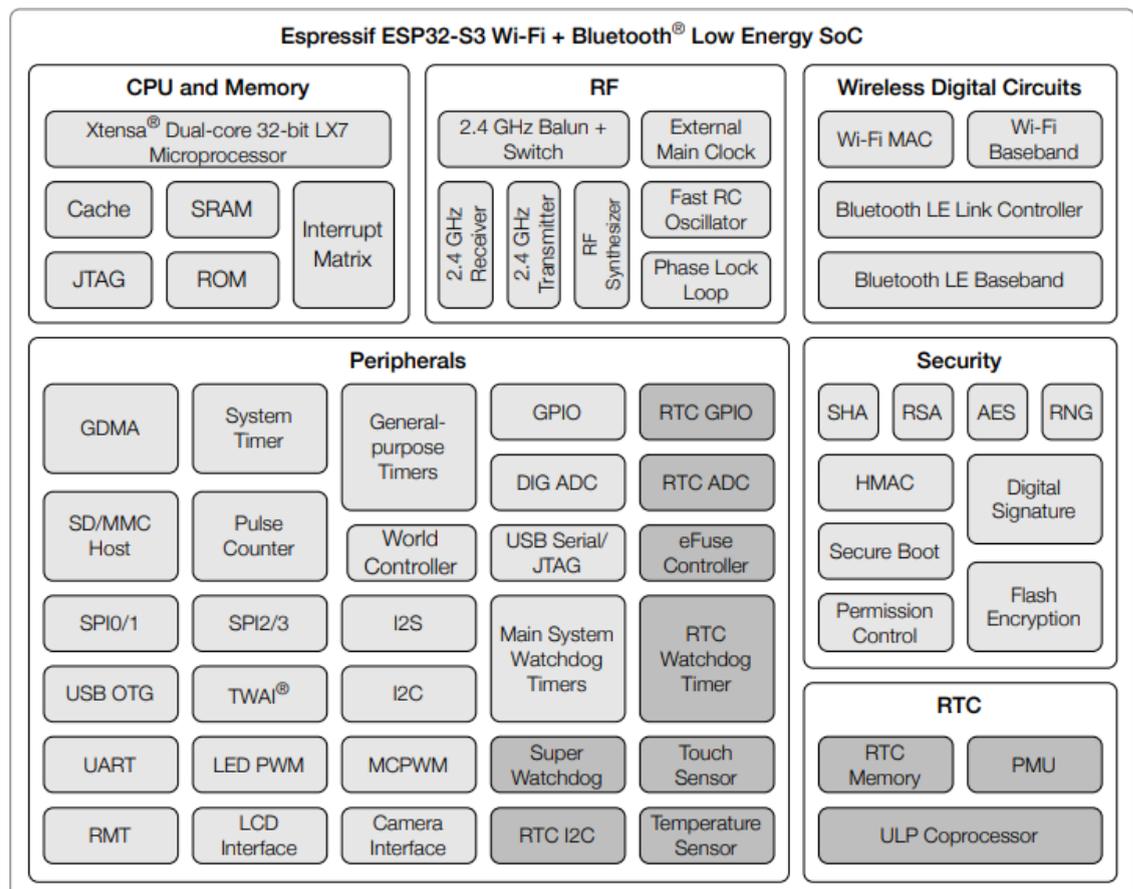


Figura 10. Arquitectura del ESP32-S3.

En la figura 2-7 podemos observar un diagrama de bloques funcionales del ESP32-S3, como hemos comentado con anterioridad, lo más destacable es su

capacidad integrada de comunicaciones inalámbricas acogidas a estándares internacionales como Bluetooth V4.2, Bluetooth Low Energy y WiFi 802.11n.

El microcontrolador cuenta con un microprocesador Dual-Core de 32 bits fabricado por la empresa Xtensa, soporta velocidades de hasta 240 MHz con un CoreMark base de 613 utilizando un único núcleo a máxima velocidad, obteniendo una marca mayor al emplear ambos núcleos.

El microcontrolador cuenta con una memoria SRAM interna utilizada para almacenar variables en tiempo de ejecución de 512KB, reduciendo su capacidad de manera significativa al trabajar en modo de tiempo real. La memoria Flash puede ser interna, pero en la mayoría de los casos se requiere una memoria externa, el ESP32-S3 admite una memoria flash de hasta 16 MB dependiendo del modelo y se encarga de almacenar el programa y la configuración del microcontrolador.

El ESP32-S3 cuenta con 45 pines configurables de propósito general de los cuales 4 son utilizados para configurar el microcontrolador y 6 o 7 pines más son utilizados para la memoria Flash y PSRAM externas, dejándonos con un total de 35 o 34 pines dependiendo del modelo de memoria externa.

Los pines restantes pueden ser configurados como entradas o salidas digitales, salidas PWM, entradas analógicas o salidas analógicas, además estos pines también pueden ser empleados para interfaces de comunicación como Serial Peripheral Interface o SPI, Inter Integrated Circuit o I2C, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter o UART e incluso CAN en algunos modelos.

En cuanto a los protocolos de comunicación mencionados en el párrafo anterior, el ESP32-S3 cuenta con dos buses SPI para la memoria Flash y PSRAM y 2 buses más de propósito general, dos buses I2C, tres buses Universal Asynchronous Receiver-Transmitter UART.

Cuenta con dos convertidor analógico-digital de 12 bits, cuatro temporizadores de 54 bits de propósito general, dos controladores de motores por PWM y capacidad de máximo ocho canales PWM independientes aplicables a cualquier cualquier pin.

El ESP-32 puede ser comprado como un circuito integrado para el cual en la placa de circuito impreso o PCB deberá integrarse una antena para disponer de la capacidad WiFi y Bluetooth, o se puede adquirir como un módulo que ya integra la antena y todos los componentes externos como la memoria flash. Este microcontrolador puede encontrarse en diferentes productos que integren comunicaciones inalámbricas, ya que gracias a este podemos suprimir los componentes adicionales necesarios para otros microcontroladores para acceder a estas capacidades, un ejemplo de producto que integre este microcontrolador es el relé inteligente Shelly 1.

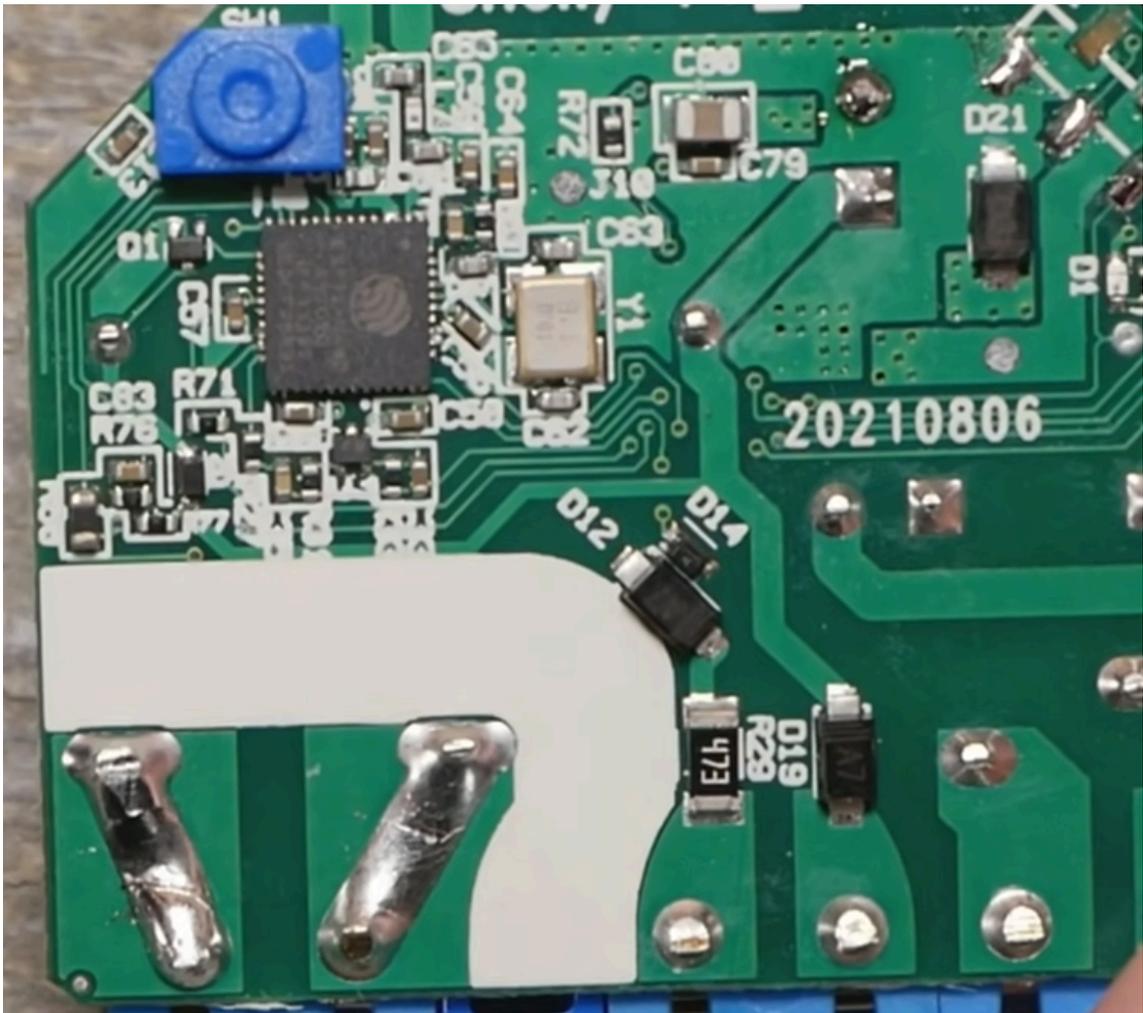


Figura 11. PCB Relé inteligente Shelly 1.

Capítulo 3. Estado del arte

El diseño de PLCs con microcontroladores o Micro PLCs ha evolucionado de manera significativa con el auge del IoT en la última década. Estos sistemas permiten una automatización más flexible, escalable y económica frente a los sistemas tradicionales ofreciendo una solución con mayor flexibilidad a un precio más asequible que un PLC tradicional incorporando tecnologías avanzadas que permiten el monitoreo remoto y la toma de decisiones en tiempo real. En este contexto, el uso del microcontrolador ESP32, se ha convertido en una opción atractiva debido a sus bajo coste, alto rendimiento y capacidad de comunicación integrada, haciéndolo ideal para aplicaciones IoT.

Este estado del arte tiene como objetivo proporcionar un panorama general de las soluciones Micro PLC y su aplicación en entornos IoT. En el estado del arte cubriremos las principales plataformas de desarrollo, productos similares, casos de aplicación, que demuestran la viabilidad de estos sistemas, y tendencias que podrán influir en la evolución futura de los Micro PLCs.

3.1 Micro PLCs.

El ámbito de la automatización ha sido gobernado durante décadas por los PLC, tradicionalmente estos están diseñados con microprocesadores robustos y sistemas modulares capaces de manejar procesos complejos. Con el avance tecnológico de los microcontroladores, surgió una nueva categoría de PLCs que integran estos componentes, conocidos como Micro PLCs . En esta sección analizaremos sus características, ventajas y áreas de aplicación.

Los microcontroladores son circuitos integrados que combinan un procesador, memoria y periféricos de entradas y salidas en un único chip. Estos son ampliamente utilizados en aplicaciones embebidas debido a su bajo costo, tamaño y eficiencia. En el contexto de los PLC los microcontroladores permiten fabricar dispositivos de menor tamaño y coste sin sacrificar funcionalidades importantes.

Los Micro PLCs son capaces de ejecutar programas de control en tiempo real gestionando las entradas y salidas eficientemente, aunque su memoria es menor que los PLCs tradicionales estos pueden almacenar programas de tamaño moderado, los microcontroladores modernos incluyen conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada y son capaces de interactuar con sensores y actuadores.

Frente a los PLCs tradicionales, los Micro PLCs ofrecen varias ventajas que los hacen atractivos para ciertas aplicaciones, como su bajo coste, tamaño compacto, facilidad de integración en proyectos IoT y su eficiencia energética. Sin embargo también tienen desventajas frente a los controles tradicionales, como su capacidad de procesamiento que no puede igualar la de los microprocesadores usados en PLCs y la limitación de entradas y salidas.

Aunque presentan desventajas frente a los PLCs tradicionales, los Micro PLCs han encontrado un nicho de mercado donde la simplicidad, el costo y el tamaño son consideraciones relevantes, haciéndolos más viables que los PLCs tradicionales. Sus campos de aplicación son la domótica, instalaciones de pequeña industria y proyectos IoT.

La gran popularidad ganada por comunidades como Arduino, ESP32 y STM32 ha facilitado la implementación de estos Micro PLCs, gracias a la gran cantidad de bibliotecas y proyectos compartidos en plataformas como GitHub, impulsando su utilización en proyectos “do it yourself”

3.2 Principales plataformas de desarrollo.

En la fase de diseño de un sistema Micro PLC es crucial tener un buen entendimiento del hardware y la plataforma de desarrollo de software que se utilizará ya que existen numerosos microcontroladores cada uno de ellos poseyendo características y capacidades únicas distintas entre sí. Durante esta sección vamos a exponer varias plataformas de hardware junto a sus respectivas plataformas de desarrollo destacando tanto sus beneficios como sus inconvenientes.

El componente físico fundamental en el desarrollo de un Micro PLC es el hardware y la selección del microcontrolador es un momento crucial ya que define las

capacidades y el rendimiento del sistema en función de sus características específicas; también discutiremos los microcontroladores más utilizados en la actualidad considerando sus atributos positivos y negativos así como sus aplicaciones típicas.

- 1. ESP32:** El ESP32 es un microcontrolador desarrollado por la empresa Espressif, cuenta con un procesador de 32 bits de uno o dos núcleos Xtensa LX6, cuenta con comunicación Wi-Fi y Bluetooth nativa y presenta gran cantidad de pines de propósito general con distintas interfaces de comunicación como I2C, SPI y UART.
 - **Ventajas:** El ESP32 ofrece una gran capacidad de procesamiento y conectividad inalámbrica, haciéndolo ideal para aplicaciones de IoT. El precio de este microcontrolador es muy competitivo y tiene gran soporte de la comunidad.
 - **Desventajas:** El ESP32 es un microcontrolador con un alto consumo de energía en comparación con otros microcontroladores, el fabricante recomienda una fuente de alimentación capaz de suministrar 500 mA mínimo.
 - **Aplicaciones Típicas:** Debido a su capacidad de comunicación inalámbrica integrada, el ESP32 es altamente empleado en proyectos IoT, sistemas de control remoto y proyectos de domótica.
- 2. STM32:** El STM32 es un microcontrolador desarrollado por STMicroelectronics, integra un procesador Cortex-M de arquitectura ARM, ofrecen gran flexibilidad debido a su amplia gama de microcontroladores.
 - **Ventajas:** El STM32 ofrece una amplia gama de microcontroladores para adaptarse a los requisitos del proyecto y las necesidades de diseño, la documentación que ofrece el fabricante es muy completa y detallada.
 - **Desventajas:** La configuración del IDE de programación puede ser muy compleja debido a la necesidad de configurar la frecuencia de reloj.
 - **Aplicaciones Típicas:** El STM32 es altamente empleado en el entorno industrial.

3. **Arduino:** El ATmega es un microcontrolador de 8 bits fabricado por Atmel que se puede encontrar en las placas de desarrollo de Arduino, son muy populares por su facilidad de uso.
 - **Ventajas:** Es ideal para prototipado rápido, cuenta con una extensa comunidad de soporte y librerías debido al tiempo que lleva en el mercado.
 - **Desventajas:** Su capacidad de procesamiento y memoria son limitadas en comparación con modelos de microcontroladores más recientes.
 - **Aplicaciones Típicas:** Debido a sus bajas capacidades es empleado principalmente en el campo educativo y en etapas de prototipo.
4. **PIC:** Los microcontroladores PIC fabricados por Microchip, ofrecen una amplia gama de microcontroladores con versiones de 8, 16 y 32 bits a un precio asequible.
 - **Ventajas:** Los microcontroladores PIC son versátiles y ofrecen una gran variedad de modelos para satisfacer diferentes necesidades. Cuenta con un IDE de programación estable con soporte para diferentes lenguajes de programación.
 - **Desventajas:** Su manejo es más complejo en comparación con otros microcontroladores como el ATmega.
 - **Aplicaciones Típicas:** Estos microcontroladores son empleados en proyectos de automoción, industria y sistemas de comunicaciones.
5. **RP2040:** El RP2040 es un microcontrolador fabricado por Raspberry Pi empresa conocida por las Raspberry Pi, un mini ordenador de placa única. Este microcontrolador cuenta con un procesador ARM Cortex-M0 de doble núcleo que se puede encontrar en sus placas de desarrollo Raspberry Pi Pico
 - **Ventajas:** Este microcontrolador ofrece gran flexibilidad de programación admitiendo lenguajes como C/C++ y micropython. Su principal fortaleza es su precio, con un costo de menos de 1 euro y una gran disponibilidad
 - **Desventajas:** Aunque este microcontrolador es potente y tiene un costo reducido, no cuenta con capacidad de comunicación Wi-Fi.
 - **Aplicaciones Típicas:** Su principal uso es en pequeños proyectos y etapas de prototipado.

Microcontrolador	Tensión de alimentación	Pines de proposito general	Memoria	Conectividad	Consumo de energia Maximo	Velocidad Maxima del Procesador
ESP32-S3-Wroom-1-N16	3,3V	36	16MB	Wi-Fi y Bluetooth	300mA	240MHz
ATmega 328-PU	5V	23	32kB	No nativa	9mA	8MHz
STM32WB55	3,3V	72	1MB	Bluetooth y Zigbee	130mA	64MHz
PIC WFI32E03UC	3,3V	37	2MB	Wi-Fi	284mA	200MHz
RP2040	3,3V	30	16MB	No nativa	91,6mA	133MHz

Tabla 1. Comparativa de Microcontroladores.

Cada microcontrolador es compatible con diferentes entornos de desarrollo de software, la elección del entorno influye en la facilidad de programación y optimización del código. A continuación presentaremos los entornos de desarrollo compatibles con los microcontroladores mencionados anteriormente, detallando sus ventajas y desventajas.

- 1. Arduino IDE:** Arduino IDE es una plataforma de desarrollo muy popular, es muy fácil de usar y nos permite programar un gran número de microcontroladores como el Arduino, ESP32 y algunos modelos de STM32.

 - **Ventajas:** Este IDE es idóneo para principiantes, cuenta con un gran número de librerías que facilitan el desarrollo de proyectos.
 - **Desventajas:** Este IDE de programación puede ser limitado para proyectos de alto nivel que requieran configuraciones avanzadas del hardware.
- 2. PlatformIO:** PlatformIO es una extensión creada para Visual Studio Code, es compatible con un gran número de microcontroladores.

 - **Ventajas:** Es compatible con varios editores como Visual Studio Code, permite la gestión avanzada de dependencias, desarrollo remoto y análisis del firmware desarrollado.
 - **Desventajas:** Puede ser más complejo que otros IDEs , debido a su configuración inicial y gestión de entornos.
- 3. STM32 CubeIDE:** Este entorno se ha desarrollado por la empresa STMicroelectronics basado en Eclipse, para programar sus microcontroladores STM32, en este IDE podemos configurar las funciones de los diferentes pines del microcontrolador así como las frecuencias de reloj y el desarrollo del código del proyecto.

- **Ventajas:** Soporta operaciones de depuración avanzada como selección del núcleo de ejecución o visualización de la memoria en vivo, cuenta con una buena documentación y ejemplos desarrollados por la empresa.
 - **Desventajas:** Mayor complejidad que otros entornos por el gran número de configuraciones que se deben realizar y requiere más recursos del sistema.
4. **MPLAB x IDE:** Es la herramienta de desarrollo para los microcontroladores PIC desarrollada por Microchip, ofrece herramientas avanzadas para el desarrollo de proyectos basados en sus microcontroladores.
- **Ventajas:** Compatible con todos los microcontroladores ofrecidos por la empresa, incluye un gran número de herramientas como visualizador de datos, monitorización de entradas y salidas e integración de programadores como el PICkit, permite el uso de diferentes compiladores admitiendo lenguajes de programación como C o Assembly.
 - **Desventajas:** La interfaz es compleja y menos intuitiva que las de otros IDEs.
5. **ESP-IDF:** ESP-IDF o ESP- IoT Development Framework es el framework de programación oficial de Espressif.
- **Ventajas:** Permite la programación en C o C++, puedes instalar la aplicación o integrar el entorno en programas como Visual Studio Code y provee acceso a todas las características del ESP32 a diferencia de otros IDEs como Arduino en el que ciertas características como la gestión de los eFuses no están disponibles.
 - **Desventajas:** Mayor complejidad frente a otros entornos de programación disponibles.
6. **MicroPython:** Es una implementación ligera de python utilizada para microcontroladores como el ESP32 o el RP2040.
- **Ventajas:** Python es un lenguaje con un aprendizaje muy rápido al no necesitar definir tipos de variables, haciéndolo perfecto para un desarrollo rápido y sencillo.

- **Desventajas:** Menor rendimiento en comparación con otros lenguajes como C o C++, lo que limita su rendimiento en aplicaciones que requieren alta velocidad de procesamiento.

Las plataformas de desarrollo o IDEs varían entre ellas en términos de complejidad, soporte, capacidades y facilidad de uso por ello su elección depende del microcontrolador seleccionado y los requisitos de la aplicación a desarrollar. El microcontrolador seleccionado influye en las limitaciones de hardware como el tamaño de la memoria disponible, la capacidad de comunicación inalámbrica y la velocidad de procesamiento, mientras que la selección del IDE determina la capacidad del compilador para optimizar el código, la compatibilidad de lenguajes de programación y la cantidad de recursos desarrollados por la comunidad para el mismo.

3.3 Antecedentes.

En esta sección presentaremos algunos de los Micro PLC disponibles en el mercado junto con una breve descripción de sus características, la mayoría de ellas compartidas como la conectividad o disponibilidad de módulos de ampliación y mayoritariamente difieren en la unidad de procesamiento, el número de entradas y salidas disponibles y protocolos de comunicación integrados.

3.3.1 Arduino OPTA.

Arduino OPTA es un Micro PLC desarrollado por la empresa Arduino en colaboración con Finder para aplicaciones en pequeña industria y el hogar. Utiliza un microcontrolador STM32 de doble núcleo con capacidad de control en tiempo real, monitoreo e implementación de mantenimiento predictivo. Presenta compatibilidad con entornos que cumplen con el estándar IEC 61131, posibilidad de utilizar diferentes protocolos de comunicación IoT como Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth o Modbus, cuenta con 8 entradas digitales y 4 salidas de relé y existe la posibilidad de adquirir módulos de ampliación de entradas y salidas.

El arduino Opta está disponible en tres versiones diferentes que difieren en los protocolos de comunicación que disponen.

3.3.2 Siemens LOGO!

El siemens LOGO! es un Micro PLC desarrollado por Siemens para tareas de automatización industrial, este Micro PLC cumple con el estándar IEC 61131 de programación de PLCs industriales gracias a su suite de programación Soft Comfort Logo que permite la programación de estos controladores en los cuatro lenguajes principales. Cuenta con un gran número de módulos adicionales de diferentes tipos como módulos digitales y analógicos, módulos de alimentación, módulos de comunicaciones y HMIs.

Este Micro PLC cuenta con 8 entradas digitales de las cuales 4 de ellas pueden configurarse como entradas analógicas, 4 salidas de relé, comunicación Ethernet, un display y bus de campo para la comunicación con los módulos adicionales. La suite de programación permite la comunicación con MQTT y servicios en la nube como Microsoft Azure.

3.3.3 Industrial Shields ESP32.

El Micro PLC ESP32 desarrollado por la empresa Industrial Shields se emplea en tareas de automatización industrial, este Micro PLC cuenta con hasta 58 entradas y salidas, comunicación Wi-Fi, comunicación LoRa, comunicación Dali y comunicación GPRS. Cuenta con un microcontrolador ESP32 como unidad de procesamiento. Este Micro PLC puede ser programado con el IDE de Arduino o ESP-IDF. Gracias a sus diferentes protocolos de comunicación es empleado en aplicaciones IoT, dentro de su página podemos ver diferentes proyectos en los que ha sido utilizado como el control de una papelera compactadora o el control de acceso a una reserva natural.

3.3.4 Industrial Shields RaspberryPi.

El Micro PLC Raspberry Pi desarrollado por Industrial Shields se emplea en tareas de automatización industrial, la unidad de procesamiento de este control es un mini PC Raspberry Pi lo que lo hace ideal para aplicaciones de gateway, gracias a su unidad de procesamiento presenta una alta velocidad de procesamiento, posibilidad

Además de trabajar con reloj de tiempo real y capacidades de comunicación Wi-Fi, el sistema operativo con el que trabaja es Linux ofreciendo una gran flexibilidad de lenguajes de programación, cuenta con una unidad de alimentación ininterrumpida y conexión RS485.

Gracias a sus características este Micro PLC es ideal para proyectos IoT que necesiten comunicaciones con servidores externos, además, gracias a su sistema operativo cuenta con la posibilidad de certificar las conexiones a estos servidores con el uso de aplicaciones como OpenSSL, que genera certificados y claves para conexión TLS o Transport Layer Security.

Capítulo 4. Estudio de necesidades y normativa aplicable.

El objetivo del proyecto es diseñar y montar un prototipo de un Micro PLC. Para ello es importante conocer las necesidades que debe satisfacer. Estas necesidades abarcan los requisitos técnicos del hardware del proyecto y las expectativas del usuario final. A continuación, presentaremos un análisis detallado de dichas necesidades.

4.1 Necesidades funcionales.

- **Programabilidad:** El dispositivo debe ser programable, permitiendo al usuario final realizar cambios en el script para adecuar el funcionamiento a sus necesidades.
- **Conectividad:** El dispositivo debe contar con interfaces de comunicación, como Wi-Fi, Bluetooth y Ethernet para poder comunicarse con diferentes servicios como un broker de MQTT, Home Assistant u otros módulos. También debe contar con USB para programar el dispositivo.
- **Compatibilidad:** El dispositivo debe ser compatible con diferentes lenguajes de programación e IDEs de programación, permitiendo al usuario final programar en la herramienta de su preferencia.

4.2 Necesidades del usuario.

- **Facilidad de uso:** El usuario debe ser capaz de utilizar el dispositivo de manera sencilla y sin necesidad de conocimientos avanzados de programación.
- **Sencillez:** El usuario debe ser capaz de instalar el dispositivo de manera sencilla y sin necesidad de herramientas especiales.

4.3 Necesidades de producción.

- **Design For Manufacturing:** El diseño del dispositivo debe acogerse a las capacidades del fabricante para asegurar su correcta fabricación y los componentes seleccionados deben estar activos en el mercado para asegurar su adquisición.

4.4 Normativa aplicable al diseño electrónico.

En el diseño de PCBs la normativa con mayor aceptación por la industria del diseño electrónico son las normativas IPC, en estas normativas se recogen las mejores prácticas de diseño, fabricación e inspección de circuitos impresos.

Pese a que estas normas no son de obligatorio cumplimiento aportan robustez y seguridad al producto, además pueden ayudar a reducir los niveles de emisiones electromagnéticas facilitando pasar los ensayos de pruebas electromagnéticas para certificaciones.

Entre las normativas más empleadas se encuentran:

- **IPC 2152:** Normativa utilizada para el correcto dimensionamiento de de pistas en la PCB para soportar una corriente específica con un aumento de temperatura especificado por el diseñador.
- **IPC 6012E:** Normativa empleada para el correcto dimensionamiento de vías en PCB, asegurando su estabilidad térmica y mecánica.
- **IPC 4761:** Esta normativa recoge normativa sobre protección de vías en un diseño PCB y sus diferentes métodos de protección como el rellenado y recubrimiento de vías.

4.5 Normativa europea aplicable a productos electrónicos.

Para comercializar un producto electrónico en la Unión Europea, es necesario la obtención del marcado CE, para ello debemos cumplir una serie de normativas específicas para cada producto. Para este diseño se deben tener en cuenta las siguientes normativas:

- **Directiva de baja tensión (LVD) 2014/35/EU:** Pese a que esta normativa no se aplica a este proyecto debido a que solo es aplicable a productos alimentados a una tensión entre 75-1500V de corriente continua, hay aspectos importantes que se pueden tener en cuenta como las protecciones contra descargas electrostáticas.
- **Directiva de compatibilidad electromagnética (EMC) 2014/30/EU:** Esta directiva garantiza que el dispositivo no genere interferencias electromagnéticas que puedan afectar a otros equipos y la inmunidad a las mismas.
- **Directiva de restricción de sustancias peligrosas (RoHS) 2011/65/EU:** Esta normativa europea limita el uso de sustancias peligrosas en componentes y equipos electrónicos, con el fin de proteger el medio ambiente y la salud del usuario durante la fabricación, su uso y reciclaje.
- **Directiva de Equipos Radioeléctricos (RED) - 2014/53/EU:** Esta directiva es aplicada a productos con funciones de transmisión y recepción de bandas de frecuencia de 2.4GHz para garantizar que el producto no interfiera con otros sistemas. Sin embargo, si el módulo o componente de comunicaciones cuenta con la certificación RED no es necesario la certificación del producto en esta directiva, siempre que se cumpla con las recomendaciones del fabricante.

Para la obtención del mercado CE se deben realizar ensayos en laboratorios acreditados de las normativas armonizadas de las directivas anteriores para obtener un certificado de conformidad y poder presentar la declaración de conformidad que acredita que se cumple las directivas con el fin de obtener el mercado.

Capítulo 5. Soluciones alternativas y solución adoptada.

En la elección de componentes debemos tener en cuenta diferentes criterios detallados a continuación:

- **Documentación, ejemplos y librerías:** Durante la selección de productos este criterio ha sido de gran importancia. Se han seleccionado componentes con una documentación detallada y con casos de aplicación documentados.
- **Disponibilidad y ciclo de vida de los componentes:** Se han seleccionado componentes que se encuentran en producción y con alta disponibilidad, para facilitar su adquisición y reducir costes. También se debe tener en cuenta el ciclo de vida de los productos, debido a que cuando estos llegan al final de su producción se debe buscar un reemplazo en ocasiones provocando rediseños del producto por el cambio de empaquetados.
- **Estandarización:** Se ha reducido el número de componentes diferentes para reducir costes de fabricación. Esto se ha realizado con componentes como capacitores y resistencias, con los cuales se ha intentado mantener un único componente para cada valor siempre que fuera posible.

5.1 Microcontrolador.

En el desarrollo de sistemas embebidos actuales, se tiende a utilizar principalmente dos microcontroladores principalmente:

- **STM32 de STMicroelectronics:** Es ampliamente utilizado en el desarrollo de sistemas embebidos industriales. Esta familia de microcontroladores de 32 bits de topología ARM cuentan con una documentación detallada. Sin embargo, la programación de estos es mucho más compleja que la de otros microcontroladores, además los modelos más sencillos no cuentan con comunicaciones inalámbricas y los modelos de mayor rendimiento solo cuentan con comunicación Bluetooth integrada.

- **ESP32 de Espressif:** Es el microcontrolador que se ha decidido implementar en este proyecto, debido principalmente a su potencia y a la comunicación Wi-Fi integrada. Estos microcontroladores además se pueden adquirir en módulos que contienen los elementos necesarios para su funcionamiento, además de una antena tipo F invertida para la comunicación Wi-Fi y Bluetooth y un chip de memoria flash.
Se ha decidido implementar el módulo ESP32-S3-Wroom-1-N16, sus principales características son:
 - Procesador de 32 bits Xtensa LX6 de doble núcleo, con una frecuencia máxima de 240 MHz.
 - Memoria Flash externa de 16 Mb.
 - Conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth integrada.
 - 45 Gpios programables.
 - Certificación RoHS, REACH y múltiples certificados de RF.
 - Antena integrada en la PCB del módulo.
 - Múltiples periféricos como USB, UART, I2C, SPI o I2S.

Gracias a su capacidad WiFi el ESP32 es perfectamente compatible con un broker de MQTT, también es compatible con Home Assistant ya que este tiene disponible el add-on de ESP-Home que nos permite cargar un firmware en los módulos ESP32 para hacerlos compatibles con este programa y gracias a su capacidad WiFi es compatible con On The Air u OTA, esta es una librería que nos permite programar el módulo mediante la comunicación WiFi. Todas estas características lo hacen ideal para aplicaciones IoT.

5.2 Alimentación.

Para este proyecto se ha decidido utilizar una tensión de alimentación de 24V de corriente continua. Esta decisión se ha tomado teniendo en cuenta lo siguiente: la mayoría de aplicaciones industriales se alimentan a 24V facilitando la compatibilidad, la tensión de 24V es más segura de manejar a diferencia de la tensión alterna y mayor facilidad de conversión de 24V a tensiones menores como 5V ya que debido al estándar industrial existen mayor número de componentes que convierten de esta tensión de entrada a diferentes tensiones de salida.

El circuito de alimentación se puede dividir en tres bloques:

- 1. Protecciones:** Este bloque se encarga de la protección de la entrada de alimentación contra sobretensiones, sobrecorrientes y cortocircuitos y conexión en polaridad inversa. Para ello se han añadido una PTC o fusible rearmable encargado de la protección contra sobrecorrientes y cortocircuitos, un diodo TVS con una tensión de separación de 26V lo que protegerá el circuito de eventos transitorios y descargas electrostáticas y finalmente un diodo rectificador encargado de la protección contra conexiones de polaridad inversa.
- 2. Regulador 5V:** Para alimentar las bobinas de las salidas de relé debemos regular la tensión de alimentación, para ello existen dos posibles soluciones: las soluciones dedicadas compuestas por componentes individuales y las soluciones integradas que incluye el sistema integrado.

Aunque las soluciones dedicadas son más económicas que las integradas estas pueden provocar problemas a la hora de la certificación de EMC elevando los costos de la certificación.

En el primer prototipo se ha diseñado este bloque mediante una solución dedicada utilizando el regulador conmutado de tipo buck LM2596SX-5.0/NOPB de la marca Texas Instruments que regula a una tensión fija de 5V y una corriente máxima de 3A, sin embargo, se tiene pensado sustituirlo por un regulador THN10-2411WIR del fabricante TracoPower que regula a 5V y 2A, debido a que este componente es más

fiable y cuenta con certificación para aplicaciones ferroviarias y certificación de pruebas EMC, mientras que el regulador LM2596SX-5.0/NOPB al ser un regulador de tensión conmutado tiende a generar interferencias electromagnéticas por la conmutación rápida del transistor dificultando pasar las pruebas de compatibilidad electromagnética. Además, los reguladores conmutados de tipo buck tienen diferentes zonas de operación como la zona de conducción continua y la zona de conducción discontinua, generalmente queremos trabajar en una única zona de funcionamiento, debido a que si cambiamos de modo de funcionamiento el regulador perderá eficiencia, en ciertos momentos el consumo de la placa es menor que el valor de la corriente de rizado de la bobina funcionando así el regulador en modo de conducción discontinua. Por ello en la siguiente versión se ha decidido sustituirlo.

- 3. Regulador 3V3:** Para alimentar el ESP32, el colector de los optoacopladores de entrada y el módulo ENC28J60, debemos reducir la tensión de 5V a 3.3V para ello hemos elegido el regulador LDO (Low Drop-Out) TL1963A-33DCYR que nos proporciona una corriente máxima de 1.5A. Se ha elegido este regulador de tensión debido a que la caída de tensión de 5V a 3.3V es pequeña y teniendo en cuenta la tensión que reduce el regulador, la potencia que tiene que disipar también es pequeña haciendo que el regulador no se caliente debido a la potencia disipada.

5.3 USB-UART.

La programación del microcontrolador ESP32 puede realizarse mediante la interfaz UART o la interfaz USB específica para este fin. Como la interfaz USB no es del todo fiable, ya que en los foros de Espressif así lo indican algunos usuarios, se ha optado por utilizar un puente USB-UART.

Los puentes USB-UART se encargan de convertir la información recibida por protocolo USB a protocolo UART, también gestionan las señales de boot y reset del microcontrolador encargadas de activar el modo de descarga.

Se ha elegido el puente FT231XQ-R del fabricante FTDI debido a que el fabricante es reconocido por sus componentes para tecnología USB, las señales de salida generadas por el componente son de 3.3V evitando tener que incorporar un aislador y el componente viene en un paquete QFN, siendo este de un tamaño reducido.

5.4 Bloque de entradas digitales.

Para las entradas digitales del sistema se ha optado por emplear optoacopladores. Los optoacopladores son componentes que nos ofrecen aislamiento fotovoltaico entre un circuito de alta tensión y tensiones de control, para ello utiliza un LED infrarrojo en el segmento de alta tensión, cuando el led recibe corriente se ilumina excitando la base de un fototransistor configurado en emisor común que trabajara en corte y saturación. Se ha elegido el optoacoplador ILD207T de Vishay, este es un optoacoplador de salida con fototransistor que contiene dos optoacopladores en el mismo componente.

Al configurar la salida del fototransistor en emisor común la lógica de salida es inversa a la lógica de entrada, para solucionar esto se ha incluido un Schmitt trigger inverter que tiene unos valores límites de tensión positiva y negativa, cuando se superan esos límites lo detecta como valor alto o bajo y en la salida invierte el valor. El Schmitt trigger inverter seleccionado es el 74HC14D,653 de Nexperia.

5.5 Bloque de Salidas.

Para el circuito de salidas se ha optado por la utilización de relés, descartando la opción de transistores debido a lo siguiente: Los transistores solo permiten trabajar con corriente continua y en caso de querer trabajar con corriente alterna se debe diseñar otro circuito que utilice triacs y los transistores al trabajar en la zona de saturación tienen una pequeña caída de tensión entre colector y emisor al aumentar la corriente de colector o drain aumenta la disipación de calor haciendo necesario añadir un disipador para evitar el sobrecalentamiento.

Para evitar estos problemas se ha decidido utilizar relés que nos permiten trabajar con corriente continua y alterna y no se calientan en exceso con grandes cargas. Para controlar los relés vamos a utilizar un transistor BJT, debido a que el ESP32 no es capaz de suministrar la tensión y corriente nominal del relé.

Se ha elegido el relé 653-G6DN-1A-LDC5 del fabricante Omron, debido a su pequeño tamaño y su capacidad para manejar cargas elevadas. Su tensión nominal de la bobina es de 5 Vdc, su corriente de activación de 36mA lo hacen fácil de controlar mediante un transistor. Además el fabricante nos asegura hasta 100.000 ciclos de operación a máxima carga.

Para el control del relé se ha escogido el transistor BC847C,215 de Nexperia, este transistor BJT NPN tiene una corriente de colector máxima de 100mA, asegurando de esta manera que soporte la corriente del relé.

Cuando controlamos un relé mediante un transistor debemos añadir un diodo flywheel de protección, esto es debido al efecto de la Fuerza Electromotriz. Cuando energizamos un relé, la bobina de este genera un campo magnético para mover los contactos, sin embargo, cuando estamos utilizando un transistor para controlarlo y el transistor entra en zona de corte, no deja pasar corriente, el relé deja de estar energizado y el campo magnético colapsa e intenta mantener el flujo de corriente, sin embargo, como el transistor se encuentra en corte la corriente no se puede mantener por lo que el voltaje en el colector del transistor aumenta dañando los componentes electrónicos cercanos. Este fenómeno es explicado por la ley de Faraday-Lenz.

5.6 Comunicación Ethernet.

Para añadir comunicación Ethernet a microcontroladores existen principalmente dos módulos ampliamente utilizados, el ENC28J60 es un controlador de Ethernet fabricado por la empresa Microchip, este componente trabaja a 3.3 V aunque también es compatible con lógica de 5V, su control se realiza por comunicación SPI y trabaja a una velocidad de transmisión máxima de 10 MB/s. Por otro lado el W5100 de la empresa Wiznet funciona con lógica de 5V, su control al igual que el ENC28J60 se realiza mediante protocolo SPI y es capaz de trabajar a 10 MB/s y 100MB/s.

A pesar de que el W5100 de Wiznet ofrece mejores prestaciones en cuanto a velocidad de transmisión, el módulo es incompatible con el microcontrolador seleccionado por ello se ha decidido emplear el módulo ENC28J60 de Olimex.

Capítulo 6. Desarrollo de esquemático electrónico y PCB .

En este apartado vamos a explicar los pasos seguidos para el diseño del esquemático electrónico y la PCB.

Para llevar a cabo el diseño se ha empleado el software de diseño electrónico Altium, este es el programa por excelencia de diseño de PCB y actualmente es el más empleado en la industria.

Aunque el software es de pago, Altium ofrece licencias anuales para estudiantes. La complejidad de manejo de este software de diseño es elevada comparado con otros programas como KiCad o Proteus, ya que la potencia de este programa se debe a la multitud de herramientas que presenta como su base de datos de distribuidores que nos permite añadir a nuestro proyecto componentes que no son básicos en Altium, esta es una característica nativa que solo presenta Altium.

6.1 Desarrollo del esquemático electrónico.

6.1.1 Circuito de alimentación.

Como se ha comentado anteriormente el circuito de alimentación se ha dividido en tres bloques. A continuación se explican a detalle cada uno de ellos

Protecciones de alimentación

Para proteger el circuito de sobrecorrientes y cortocircuitos se ha seleccionado el fusible rearmable MF-SM075-2 del fabricante Bourns, esta tiene una corriente de sujeción o corriente de funcionamiento nominal de 750mA, para escoger este valor se ha tenido en cuenta el consumo del circuito y el valor de corriente máxima de alimentación de sensores, una vez calculado se ha elegido un componente con una corriente nominal mayor al calculado.

Para proteger contra conexiones de polaridad inversa se ha elegido el diodo schottky B340LB-13-F, se ha elegido un diodo schottky debido a que su tiempo de conmutación es menor que un diodo rectificador estándar. El diodo elegido soporta

hasta 40 V de tensión inversa y una corriente en polarización directa de 3A, además como su caída de tensión es de 450 mV la potencia disipada por este componentes es pequeña evitando que se quemé.

Para proteger contra sobretensiones y transitorios de voltaje se ha elegido un diodo TVS de tipo zener, el diodo seleccionado es el SMBJ26A de Littelfuse con una tensión de activación de 28 V, una tensión de sujeción de 26 V y una tensión de ruptura de 42V asegura que no se exceda el voltaje máximo permitido por el regulador conmutado que se encuentra a continuación.

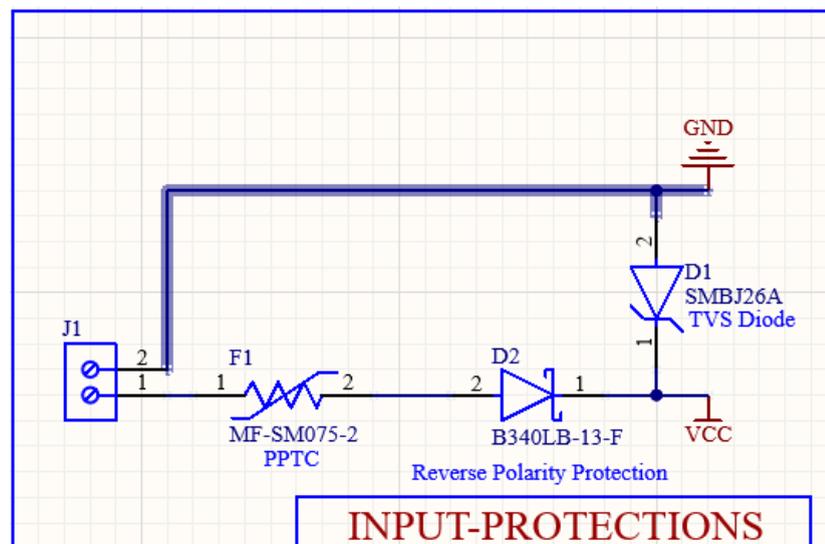


Figura 12. Esquemático protecciones

Regulador 5V

Para regular la tensión de entrada a 5V se ha empleado el regulador conmutado de tipo Buck. Se ha elegido el LM2596SX-5.0/NOPB de Texas Instruments capaz de suministrar 3 A de corriente.

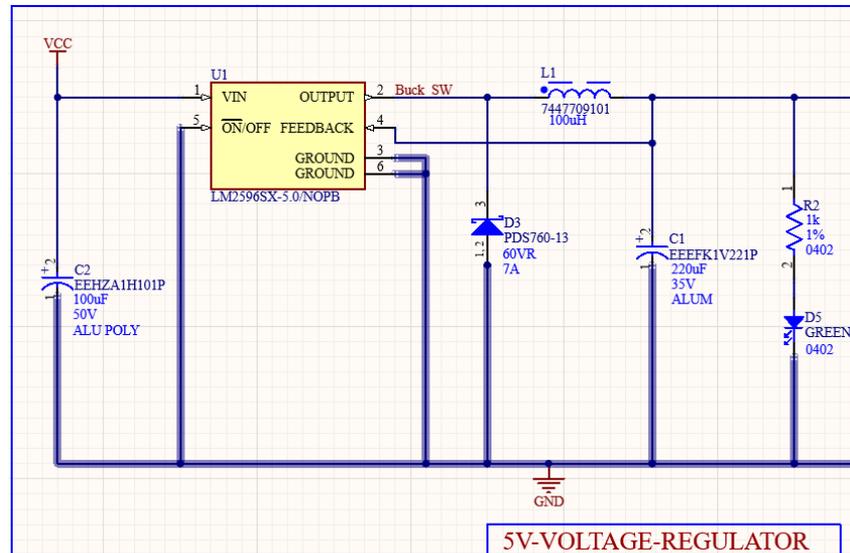


Figura 13. Esquemático Buck converter

Utilizando la herramienta WeBench del fabricante se ha diseñado el esquemático, esta herramienta permite seleccionar diferentes capacitores e inductores y observar el rendimiento del circuito con diferentes parámetros.

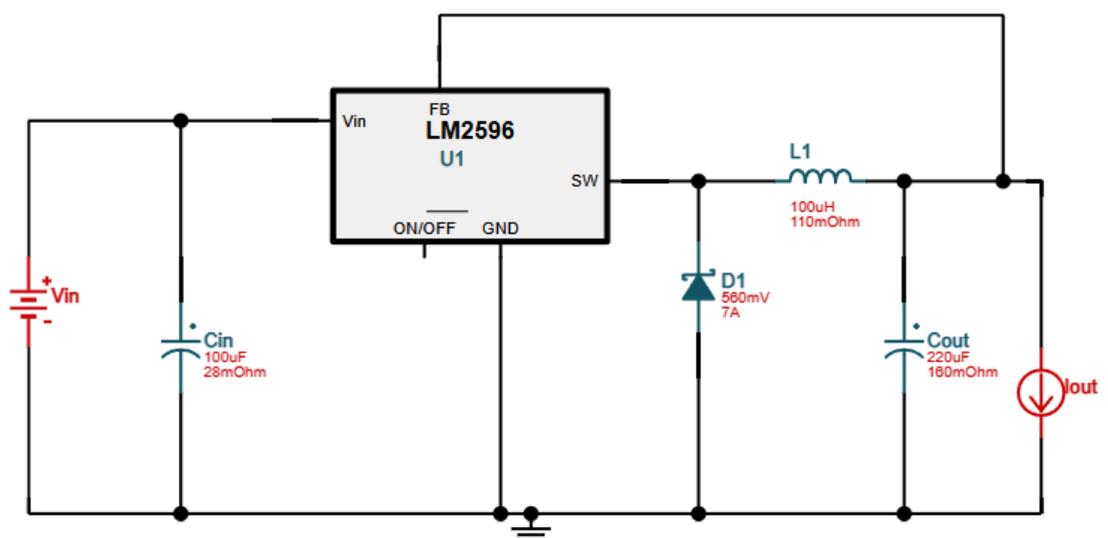


Figura 14. Circuito Webench

La lista de posibles componentes la facilita el fabricante, siguiendo las recomendaciones del datasheet se ha elegido un inductor L1 de 100 μH como se puede observar en la siguiente figura el valor coincide con el recomendado por el datasheet para una tensión de entrada de 24V y una corriente de salida máxima de 1A.

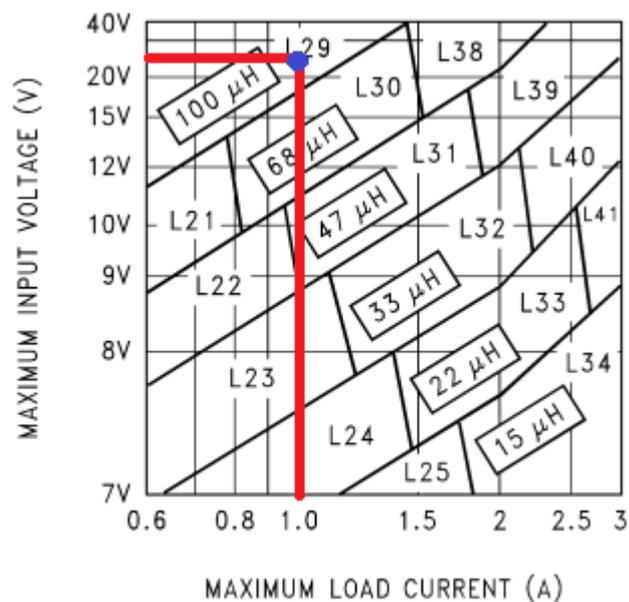


Figura 15. Tabla de bobinas

Para la selección del capacitor de salida, encargado junto al inductor de formar un filtro LC para filtrar el rizado de salida. Se ha elegido un capacitor C1 electrolítico de aluminio de 220 μF y 35 V superando la recomendación del doble de tensión de salida.

		OUTPUT CAPACITOR				
		THROUGH-HOLE ELECTROLYTIC		SURFACE-MOUNT TANTALUM		
		PANASONIC HFQ SERIES ($\mu\text{F/V}$)	NICHICON PL SERIES ($\mu\text{F/V}$)	AVX TPS SERIES ($\mu\text{F/V}$)	SPRAGUE 595D SERIES ($\mu\text{F/V}$)	
5	3	8	470/25	560/16	220/10	330/10
		10	560/25	560/25	220/10	330/10
		15	330/35	330/35	220/10	330/10
		40	330/35	270/35	220/10	330/10
		9	470/25	560/16	220/10	330/10
	2	20	180/35	180/35	100/10	270/10
		40	180/35	180/35	100/10	270/10

Figura 16. Recomendaciones del fabricante

Se ha elegido el diodo schottky D3 que tiene una corriente máxima de 7A y una tensión máxima inversa de 60V, se utiliza este tipo de diodos en vez de diodos rectificadores debido a su bajo tiempo de conmutación entre los estados de corte y conducción.

Para el capacitor de entrada C2 se ha escogido un capacitor de polímero de aluminio de 100 μF , con una tensión máxima de 50 V cumpliendo con el requisito de tensión máxima mayor que el doble de la tensión nominal.

Se ha añadido un led indicador para señalar el funcionamiento del regulador.

Regulador 3.3V

Para regular la tensión de 5 V obtenida mediante el anterior regulador, se ha implementado el regulador TL1963A-33DCYR de la marca texas instrument, capaz de suministrar hasta 1.5 A. Se ha diseñado el circuito para este componente de acuerdo al datasheet.

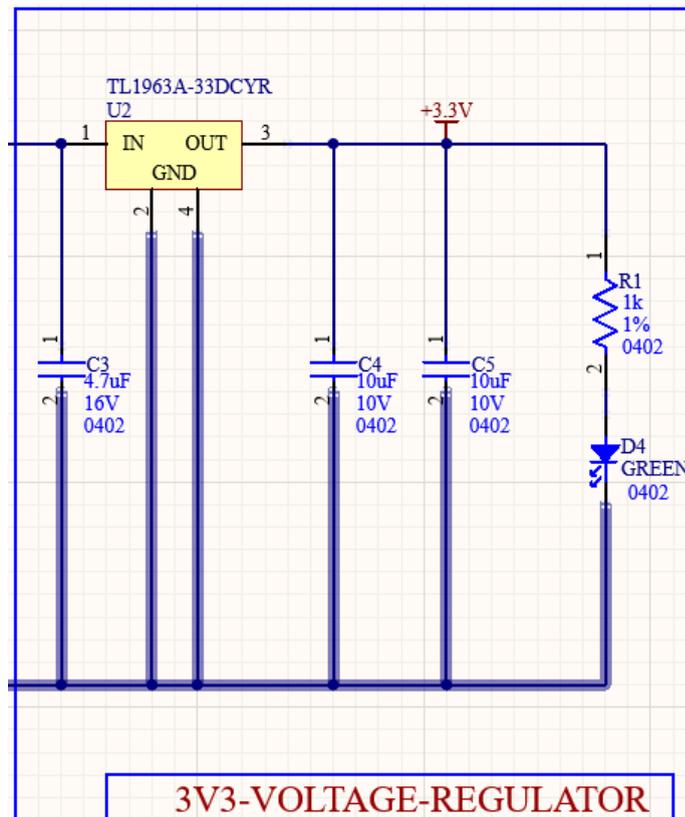


Figura 17. Esquemático regulador de voltaje

El fabricante del componente indica que para el correcto funcionamiento del regulador hace falta un capacitor de entre 1 uF y 10 uF en la entrada y un capacitor de mínimo 10 uF en la salida. Se ha incluido el capacitor de entrada C3 de 4.7 uF cumpliendose la condición del fabricante y en la salida se han incluido dos capacitores en paralelo C4 y C5 de 10 uF dando una capacitancia total de 20 uF.

6.1.2 Bridge USB_UART.

Para la implementación del bridge USB-UART FT231XQ-R, se ha empleado el datasheet para tener en cuenta las distintas configuraciones de los pines del componente, y los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del componente.

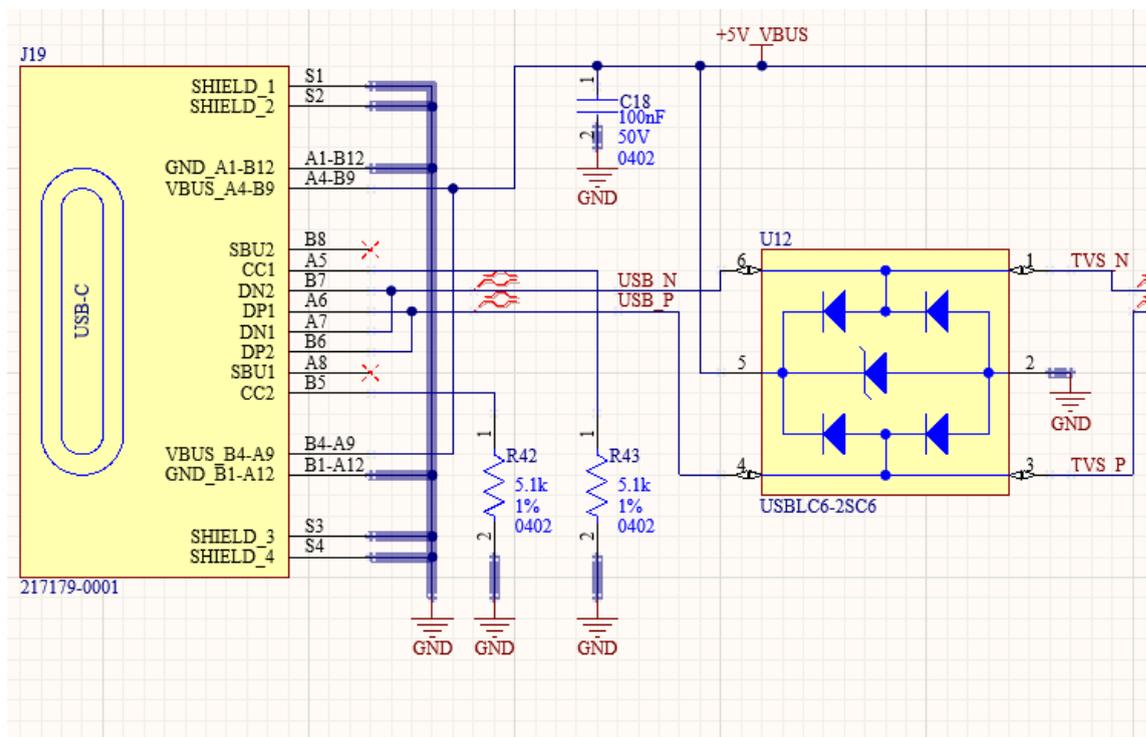


Figura 18. Esquemático USB C

Se ha seleccionado un conector usb tipo c de la marca Molex para programar el microcontrolador, las resistencias R42 y R43 son las resistencias de CC estas se utilizan para detectar en qué posición está conectado el usb y se encarga de la gestión de la corriente negociando con el host. Se ha añadido el componente USBLC6-2SC6 que es un circuito integrado de ofrecer protección ESD específicamente para pistas de USB.

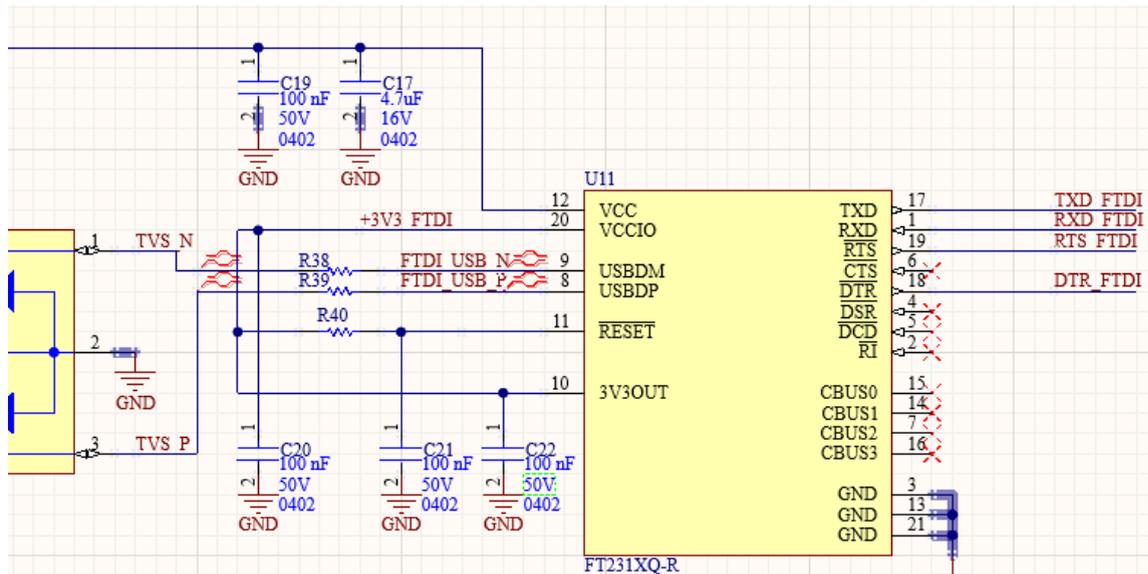
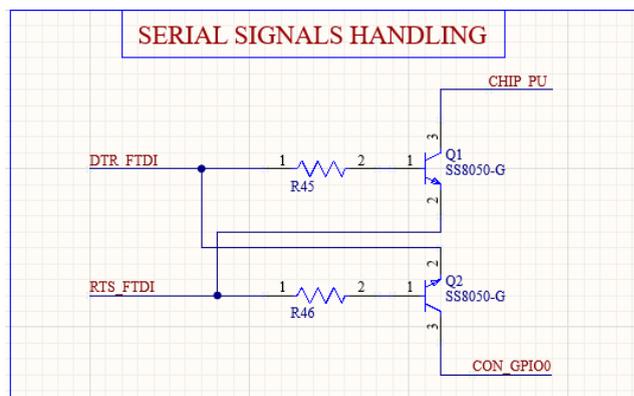


Figura 19. Esquemático bridge USB

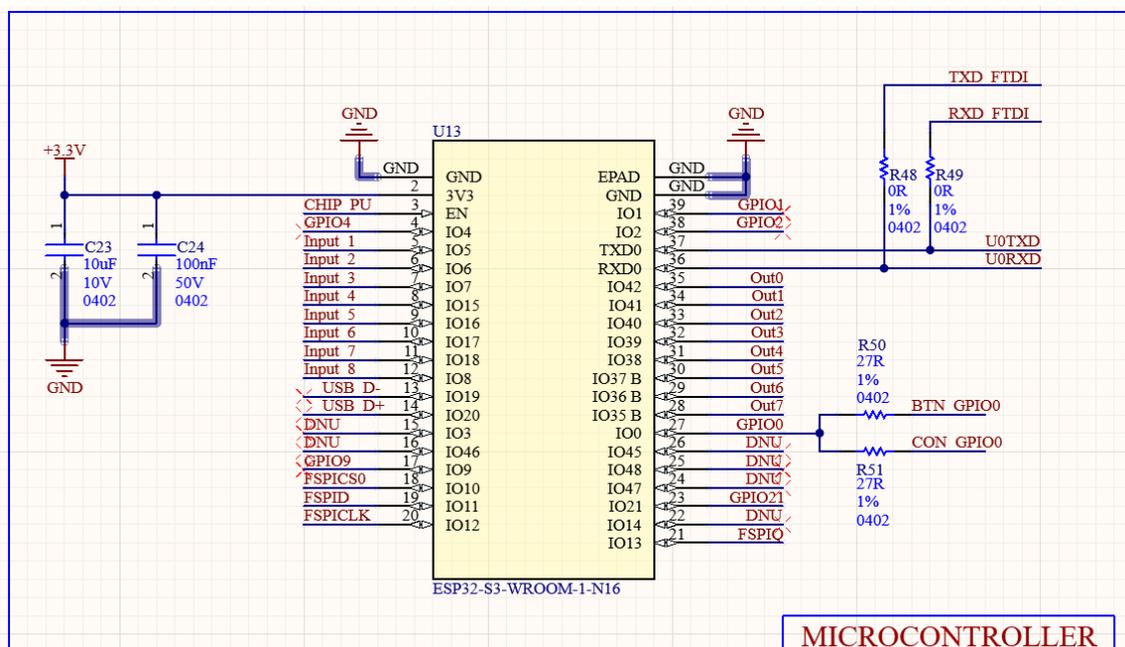
Se han añadido dos capacitores C19 y C17 de desacoplo para la alimentación del circuito integrado, se utilizan resistencias de terminación de línea R38 y R39 en este caso se utilizan resistencias de 27 ohms así como lo indica el fabricante. El pin 3V3OUT se conecta con VCCIO encargado de alimentar las células de salida del componente integrado y RESET encargado de resetear el bridge. En la parte derecha del circuito integrado están los pines RXD y TXD, estos pines se encargan de recibir y transmitir los datos. RTS y DTR son las señales encargadas de poner el microcontrolador en modo de descarga para ello utilizamos un circuito con transistores, este es el mismo circuito que se emplea en las placas de desarrollo de Espressif.



El pin CHIP-PU es el pin enable en el microcontrolador se encarga de encenderlo, por otro lado el GPIO 0 es un strapping pin encargado de seleccionar el modo de arranque, si el estado de este pin es alto el microcontrolador arrancará en modo de funcionamiento por el contrario si el estado es bajo arrancará en modo de carga de firmware. El control de estos pines es realizado por el puente usb-uart mediante los pines DTR y RTS, estos pines tienen distintas funciones por ejemplo el pin DTR o Data Terminal Ready indica cuando el equipo está listo para comunicarse y el pin RTS o Request To Send indica que se quieren transmitir datos. Estas señales junto con los transistores se encargan de poner el ESP32 en modo de programación.

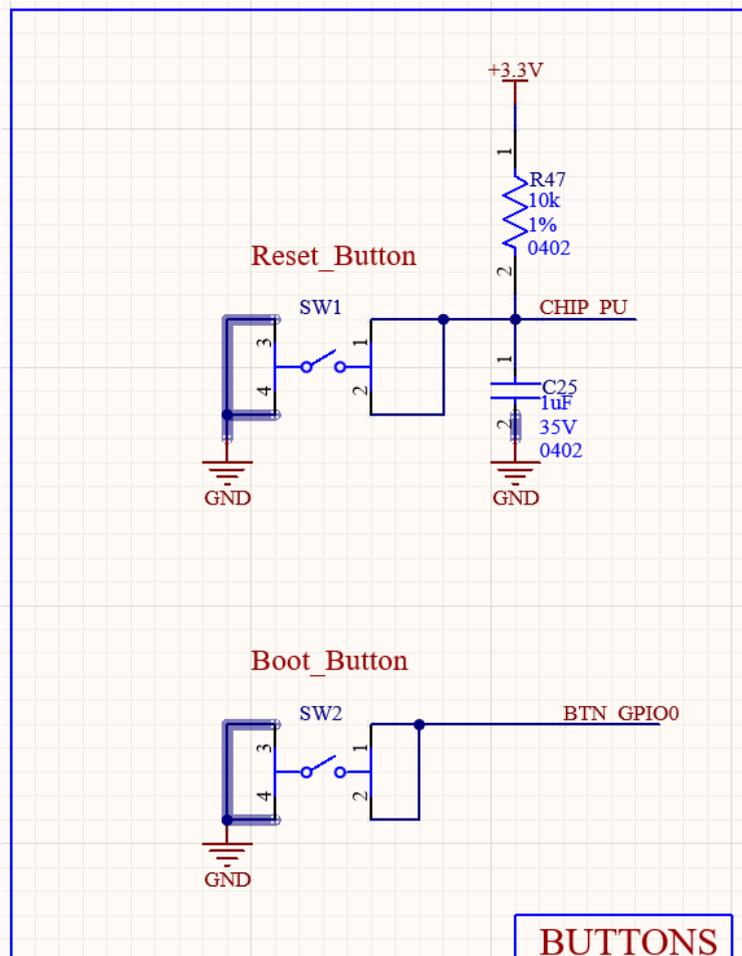
6.1.3 ESP32-S3-Wroom-1-N16.

Para la implementación del ESP32, nos hemos ayudado del datasheet del fabricante ya que este documento contiene el circuito recomendado para el módulo seleccionado.



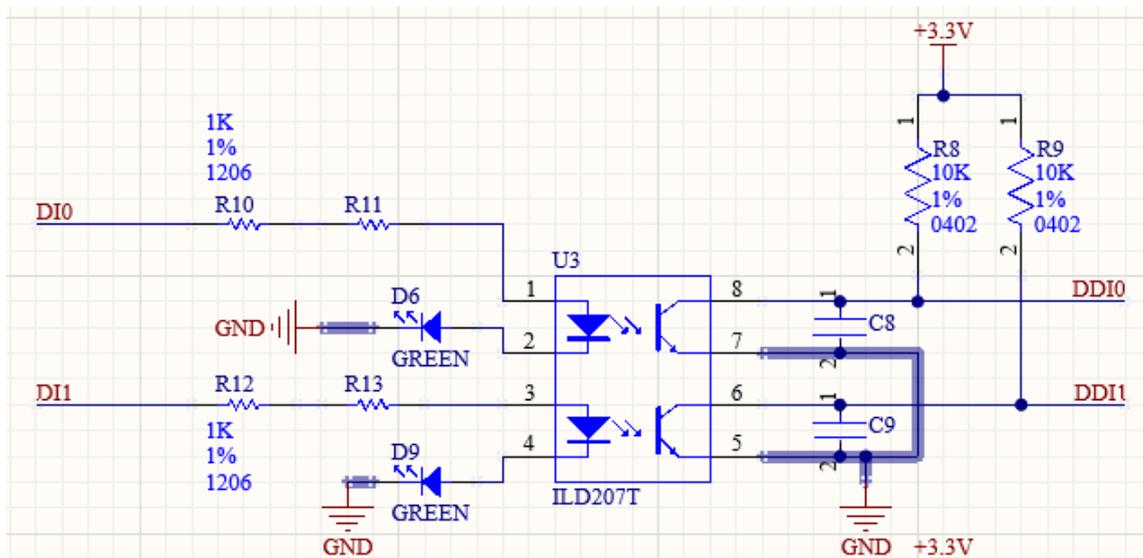
Se han incluido los capacitores de desacoplo de 10uF y 100nF en el pin de alimentación como indica el datasheet del componente, para la programación se utiliza el puerto UART0 del microcontrolador.

Para la programación del microcontrolador se utilizan los pines GPIO 0, el pin EN y el GPIO 46, el pin EN habilita el microcontrolador encendiéndose, el GPIO 0 es un strapping pin con una resistencia pull-up interna y el GPIO 46 es un strapping pin con una resistencia pull-down interna . El ESP32 se puede programar por SPI, USB y UART para programarlo debemos encender el microcontrolador con los pines GPIO 46 y GPIO 0 en un nivel específico, en este caso para programarlo mediante el puerto UART debemos tener los dos pines en nivel bajo y después activar el enable para lograr este pequeño delay se incorpora un filtro RC en el pin EN. Este proceso se puede realizar de forma manual mediante los botones incorporados o de manera automática mediante el circuito de programación del puente USB-UART.



6.1.4 Circuito de entradas digitales.

Para el circuito de entradas digitales se ha diseñado una etapa con optoaislamiento mediante optoacopladores, el circuito de entradas está diseñado para trabajar con entradas de 24V.



El datasheet del optoacoplador ILD207T, nos indica que el Current Transfer Ratio o CTR mínimo para una corriente de 10mA en el led infrarrojo es de 63% con estos datos calculamos la máxima corriente de colector en el estado de saturación.

$$I_{C_{max}} = I_F * CTR \rightarrow I_{C_{max}} = 10mA * 0.63 \rightarrow I_{C_{max}} = 6.3mA$$

Diseño del circuito de entrada del optoacoplador

Como el ESP32 mide el nivel de tensión en las entradas, la corriente no es algo relevante. Calculamos la resistencia para el led infrarrojo, debemos tener en cuenta la caída de tensión en el led indicador.

$$R_{Entrada} = \frac{V_{in} - V_{led1} - V_{led2}}{I} \rightarrow R_{Entrada} = \frac{24v - 1.2v - 2v}{10mA} \rightarrow R_{Entrada} = 2080\Omega$$

Calculamos la potencia disipada por la resistencia.

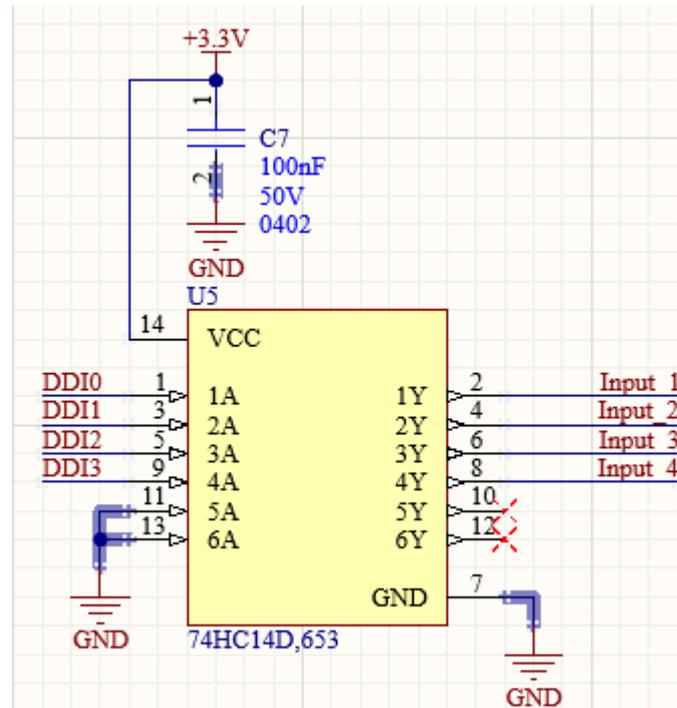
$$P_{Resistencia} = I^2 * R \rightarrow P_{Resistencia} = 10mA^2 * 2080 \rightarrow P_{Resistencia} = 208 mW$$

La resistencia seleccionada debe ser capaz de soportar mínimo 250 mW, es recomendable que soporte mayor potencia por seguridad, por ello se han elegido dos resistencias de 1K y 250 mW de potencia.

Diseño del circuito de salida del optoacoplador

Como la corriente en el lado de salida no es importante utilizamos una resistencia pull-up en el colector de 10K también se ha añadido un capacitor de 100nF para filtrar posibles ruidos de alta frecuencia. De esta manera cuando el transistor conduce la caída de voltaje es mínimo 0,4V asegurando que la entrada del ESP32 es baja, mientras que si no conduce es alta.

Para invertir los niveles de tensión de la salida del optoacoplador se ha incorporado un schmitt trigger inverter, al entrar una señal en una de las entradas de este componente la compara con un límite e invierte el nivel, es decir si lee un valor alto en la salida escribe un valor bajo. Además este componente nos ofrece una onda de salida cuadrada eliminando el ruido que pueda llevar la onda de entrada.



6.1.5 Circuito de salidas digitales.

Para la etapa de salidas se ha diseñado un circuito para controlar el relé G6DN-1A-L DC5, como el ESP32 no ofrece un nivel de tensión y corriente de salida suficiente para controlar los relés se utiliza un transistor BC847C,215, El transistor seleccionado es un transistor BJT NPN. Además como estamos utilizando relés debemos incluir un diodo para proteger el circuito de la fuerza electromotriz inversa que puede dañar los componentes electrónicos, el diodo debe posicionarse antiparalelo a la bobina del relé, también se ha añadido un led indicador de estado del relé.

Para diseñar el circuito debemos conocer la corriente que va a circular por el colector, esto tiene el fin de hallar la resistencia de base. debemos extraer del datasheet el voltaje colector emisor en saturación

$$I_{C_{total}} = \frac{V_{relé} - V_{CE_{sat}}}{R_{relé}} + \frac{V_{relé} - V_{led} - V_{CE_{sat}}}{R_{led}} \rightarrow I_{C_{total}} = \frac{5 - 0.1}{138.88} + \frac{5 - 2 - 0.1}{1000} I_{C_{total}} = 38mA$$

A continuación hallamos la corriente de base, para ello asumimos una ganancia del transistor de 20, aunque en el datasheet tengamos una ganancia mayor generalmente se asume una ganancia de 10 o 20 con el fin de asegurar la saturación.

$$I_C = \beta * I_B \rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} \rightarrow I_B = \frac{38mA}{20} \rightarrow I_B = 1.9mA$$

Hallamos la resistencia de base necesaria para conseguir esa corriente, para ello asumimos la mínima tensión de salida del ESP32, según el datasheet del ESP32 la mínima tensión de salida es de 2,64V. También extraemos del datasheet del transistor el voltaje de base emisor en saturación.

$$R_{base} = \frac{V_{salida} - V_{BE_{sat}}}{I_B} \rightarrow R_{base} = \frac{2.64 - 0.766}{1.9mA} \rightarrow R_{base} = 986.315\Omega$$

Debemos seleccionar siempre un valor menor y nunca mayor al valor calculado. Adicionalmente debemos añadir una resistencia de tierra en la base del transistor, esta debe ser lo suficientemente grande para no interferir con la resistencia de base. Resolvemos la malla de base con la nueva resistencia de 47k mediante el teorema de Thevenin, para ello debemos hallar la resistencia equivalente de Thevenin y la fuente de Thevenin. Para hallar la resistencia de Thevenin anulamos la fuente de voltaje y se sustituye por un cortocircuito y también anulamos la carga, quedando las resistencias de base en paralelo.

$$R_{thevenin} = \left(\frac{1}{986.315} + \frac{1}{100000} \right)^{-1} \rightarrow R_{thevenin} = 976.68\Omega$$

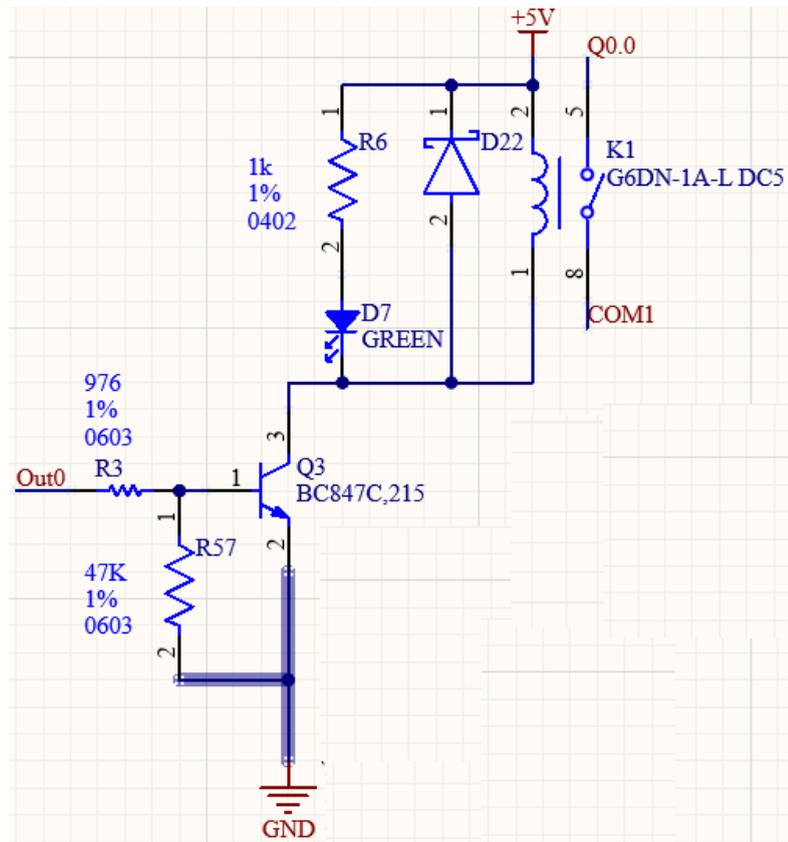
Para resolver la fuente de Thevenin debemos hacer un divisor de tensión, siendo el resultado el voltaje en la resistencia de tierra.

$$V_{thevenin} = V_{salida} * \frac{R_{tierra}}{R_{tierra} + R_{base}} \rightarrow V_{thevenin} = 2.64V * \frac{47000}{47000 + 986.315} \rightarrow V_{thevenin} = 2.58V$$

Volvemos a resolver la malla de base con la fuente y resistencia de Thevenin.

$$I_{base} = \frac{V_{thevenin} - V_{BE_{sat}}}{R_{thevenin}} \rightarrow I_{base} = \frac{2.58V - 0.766}{976.68} \rightarrow I_{base} = 1.85mA$$

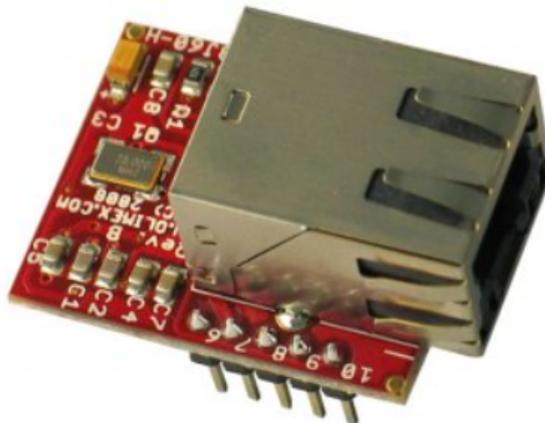
La diferencia entre la nueva corriente de base calculada y la corriente de base sin la resistencia de tierra es de 0.05mA si calculamos la nueva ganancia, el resultado es 20,54 por lo que podemos asegurar que el transistor se mantiene en saturación.

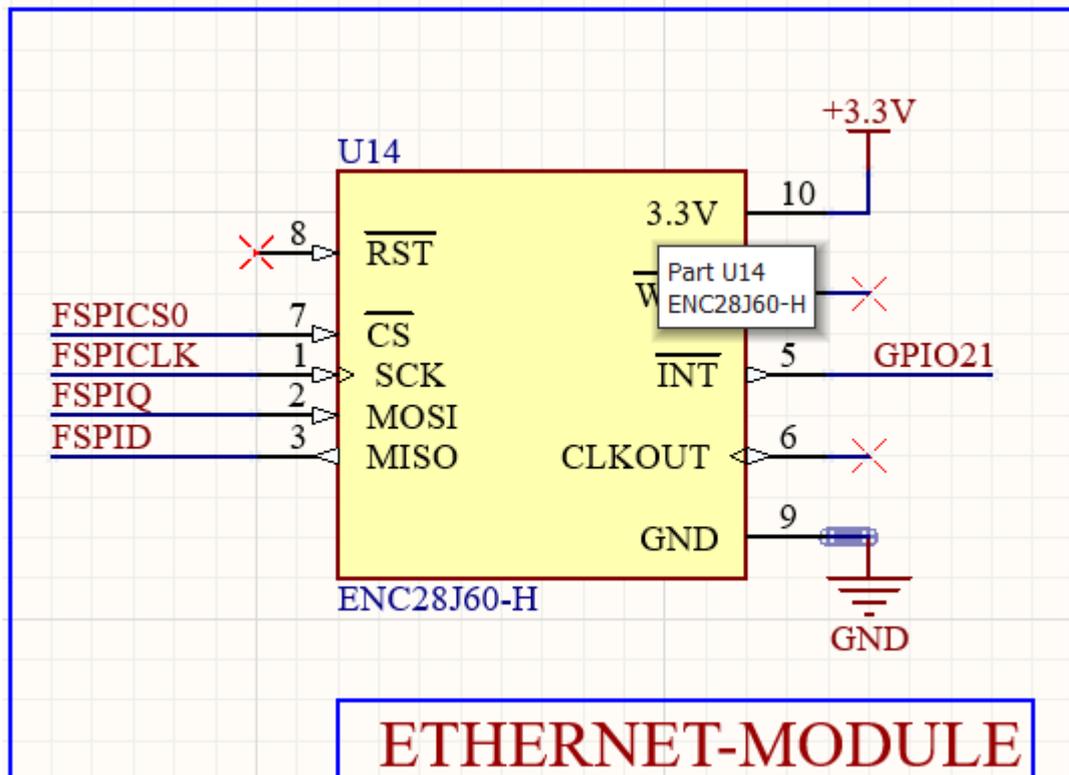


6.1.6 Módulo ethernet.

Para integrar el ENC28J60 se ha optado por emplear un módulo de la empresa Olimex. Este módulo utiliza los siguientes pines para su funcionamiento:

- **VCC y GND:** Pines de alimentación del módulo.
- **CS, SCK, MOSI y MISO:** Pines de comunicación de interfaz SPI, utilizados para comunicarse con el microcontrolador.
- **INT:** Pin de interrupción, este pin se activa cuando el ENC28J60 ha recibido información y la ha almacenado en su buffer esperando la lectura.





Generalmente el protocolo de comunicaciones SPI, requiere de resistencias pull-up en los pines de comunicación, sin embargo al utilizar un módulo estas resistencias están integradas en el mismo por lo que no es necesario añadirlas.

6.2 Desarrollo de la PCB.

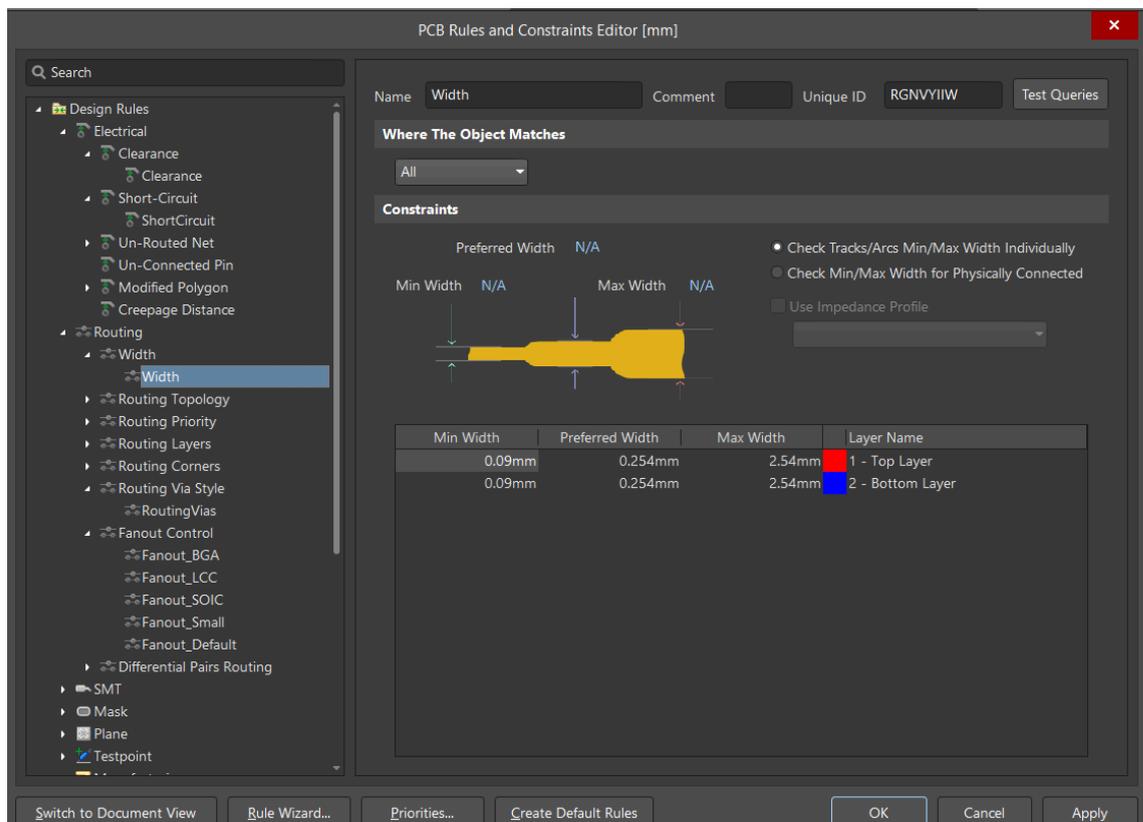
El primer paso para el desarrollo de una PCB, es estudiar la empresa que la va a fabricar. Este paso es el más importante debido a que cada fabricante tiene unas capacidades específicas que nos limitan aspectos como el mínimo tamaño de pistas, tamaño de vía preferido e incluso el apilamiento de capas de la PCB.

El siguiente paso antes de comenzar a colocar componentes sobre la PCB es elegir un apilamiento de capas, generalmente en las web de los fabricantes nos indican los distintos apilamiento que fabrican, esta decisión es de suma importancia realizarla antes de empezar a conectar componentes debido a que nos afecta en parámetros como la impedancia de las pistas.

Para este desarrollo se ha elegido el fabricante JLCPCB, esta es una empresa china bastante conocida y empleada por aficionados de la electrónica debido a su bajo coste frente a otros fabricantes como PCBWay.

Una vez seleccionado el fabricante dentro del software de diseño modificamos las reglas de diseño para adaptarlas a los máximos y mínimos del fabricante.

Dentro de Altium debemos dirigirnos a la pestaña de reglas e introducir los valores del fabricante.



La elección del apilamiento de capas también es importante como hemos comentado anteriormente, se ha decidido utilizar un apilamiento de 4 capas y se ha seleccionado el apilamiento del fabricante JLC04161H-3313.

Layer	Material Type	Thickness	
Layer	Copper	0.035mm	
Prepreg	3313*1	0.0994mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	1.3mm (with copper core)
Core>	Core	1.265mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Prepreg	3313*1	0.0994mm	
Layer	Copper	0.035mm	

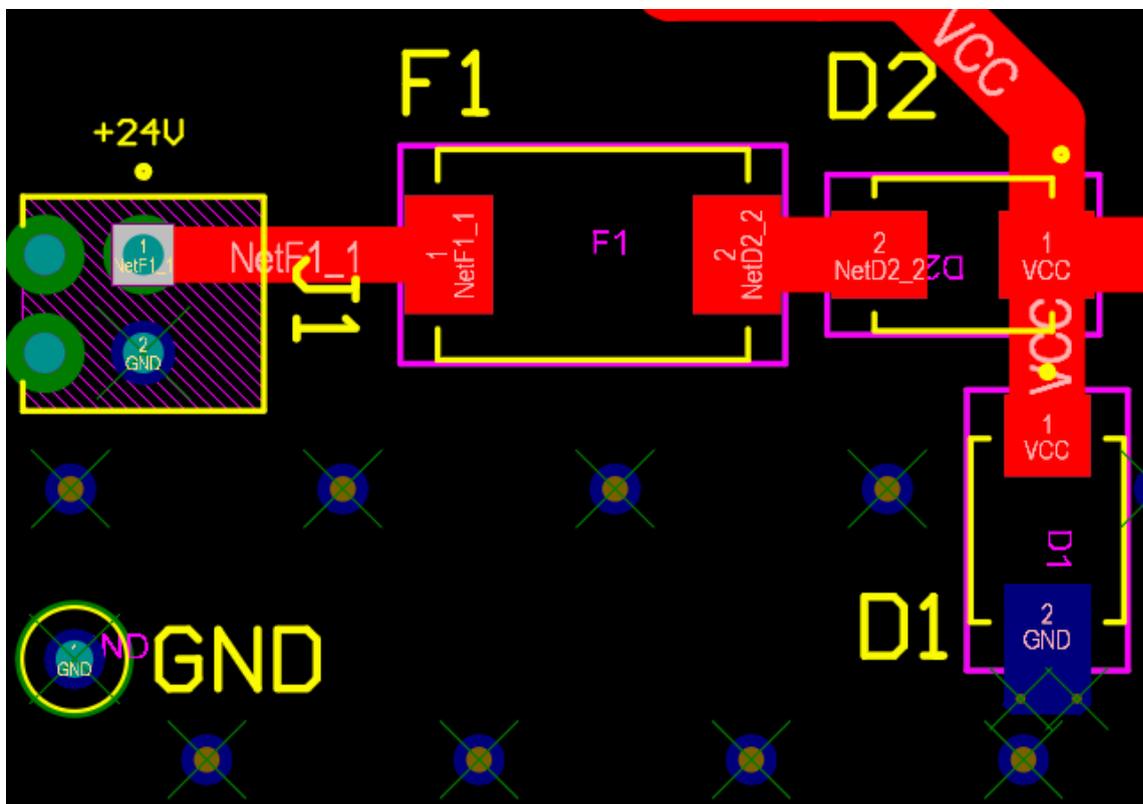
Se ha seleccionado un apilamiento de 4 capas de las cuales la capa superior e inferior son capas de señales y alimentación y las capas internas son capas de referencia, el objetivo de este tipo de apilamiento es mantener una capa de referencia lo más cerca posible de nuestras señales para que estas tengan una capa de retorno evitando así las emisiones al aire, además el uso de planos de tierra sirve como blindaje ante emisiones electromagnéticas.

El uso de planos de alimentación no es obligatorio en circuitos de baja velocidad, por lo que el enrutamiento de las alimentaciones es aceptable.

A continuación revisaremos el layout de los bloques mencionados anteriormente.

6.2.1 Circuito de alimentación.

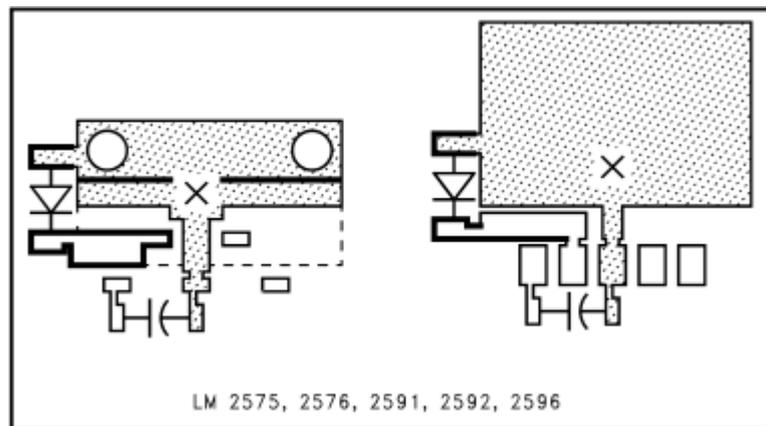
Protecciones de alimentación

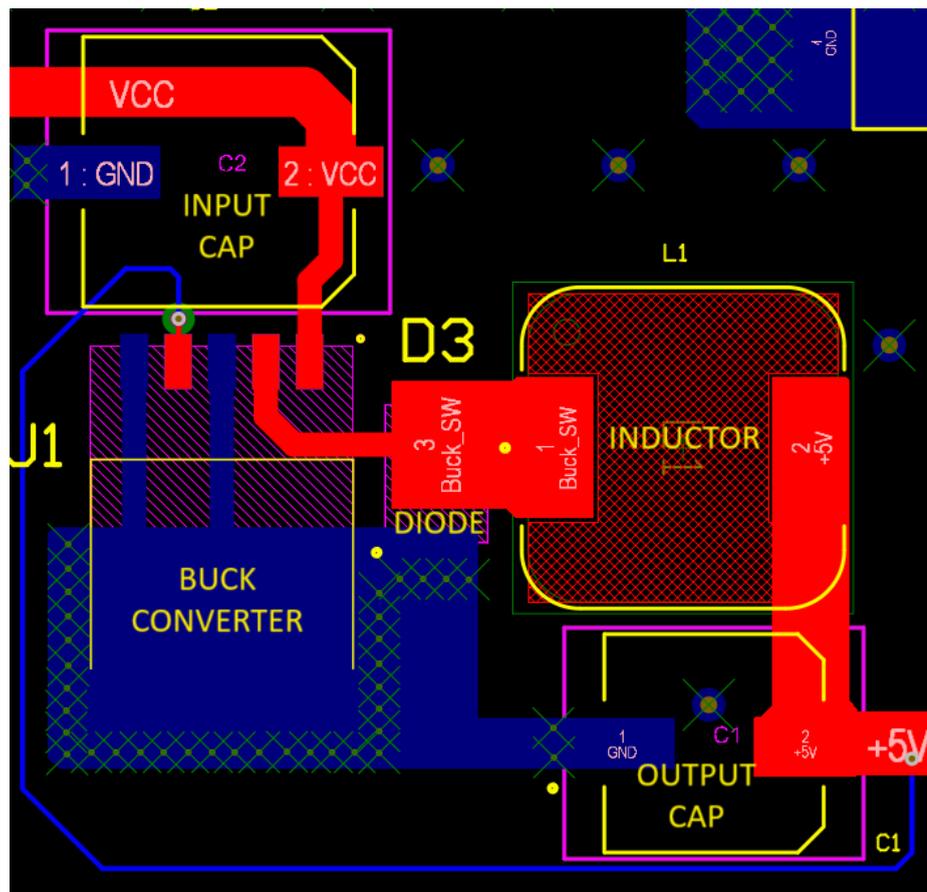


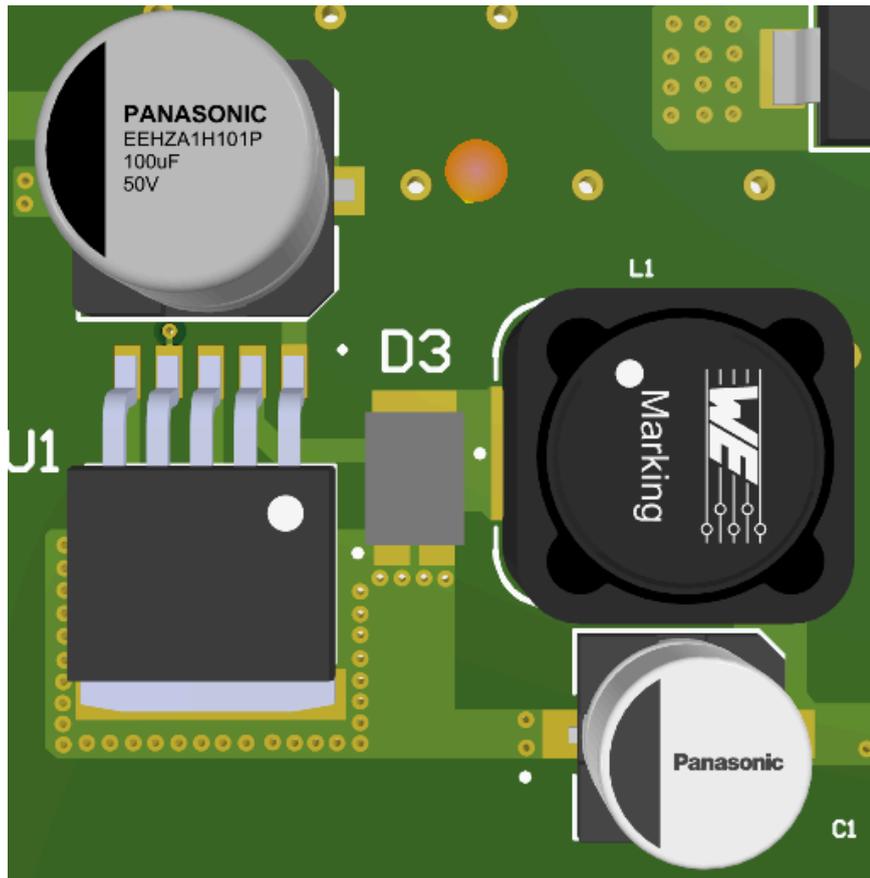
Siguiendo el enrutamiento del esquemático del circuito, podemos observar que los 24V entran por la borna hasta el fusible rearmable, seguido del fusible encontramos el diodo protector de polaridad inversa y finalmente el diodo TVS.

Regulador de conmutación 5V

Para el layout del regulador de conmutación LM2596 se han seguido las recomendaciones del documento AN-1229 del fabricante Texas Instruments, en este documento se nos indica que el footprint del circuito completo debe ser lo más pequeño posible, además hay dos componentes críticos que deben ser posicionados lo más próximos al circuito integrado posible, estos componentes son el diodo flywheel y el capacitor de entrada. También se nos indica que no es recomendable utilizar vías en los nodos Vin y SW, tampoco es recomendable ensanchar las pistas en exceso pues esto conlleva un aumento de la inductancia de la misma. Finalmente nos indica que para la pista de feedback del regulador debemos mantenernos alejados de fuentes de ruido como el nodo SW, para ello debemos mantenernos alejados de componentes como el inductor o el diodo. La forma recomendada por el fabricante es: Comenzar desde el nodo Vout del capacitor nunca del inductor, muy cerca de la salida utilizar una vía para cambiar de capa y enrutar la pista cerca del regulador evitando los componentes mencionados anteriormente utilizar otra vía muy cerca del pin de feedback y conectarlo. Para el manejo de las temperaturas del regulador nos recomiendan utilizar un plano de tierra en el Tab del regulador e incluir vías térmicas con un diámetro de taladro de 0,3-0,33 mm.



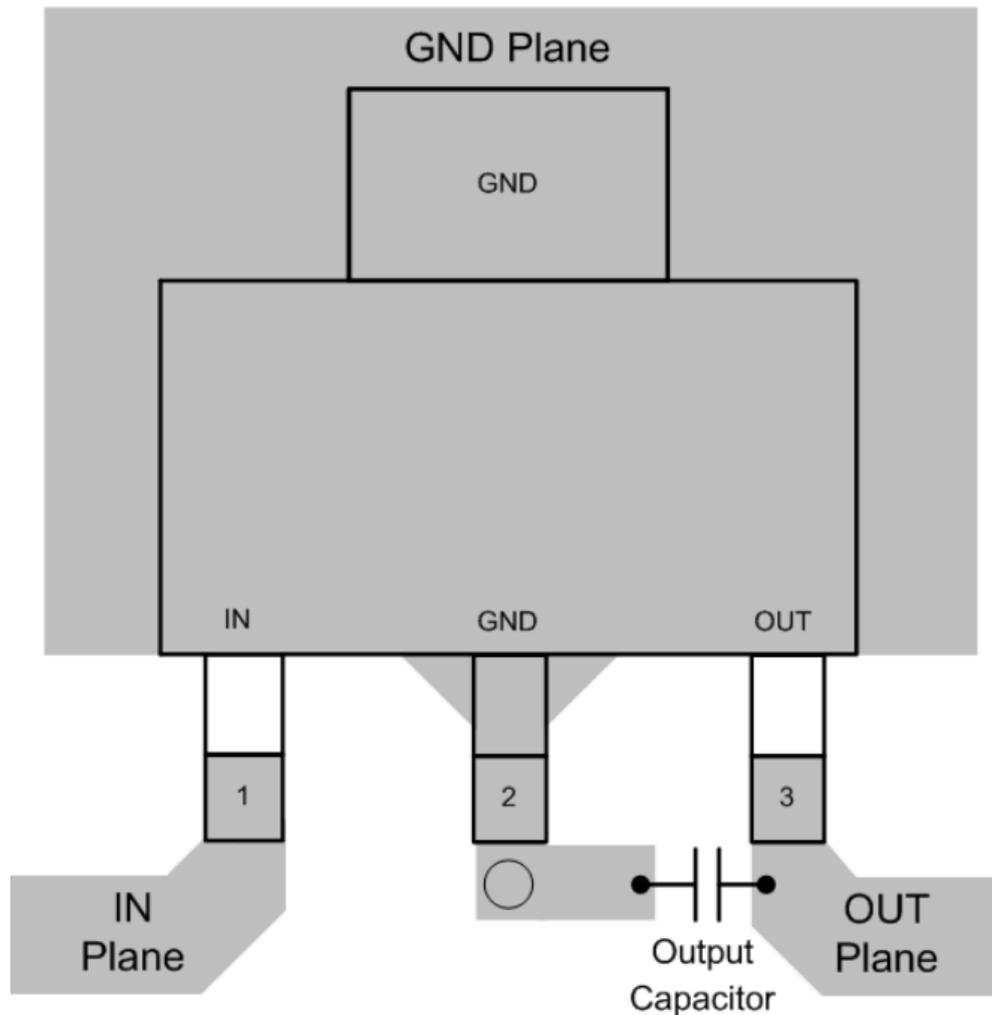


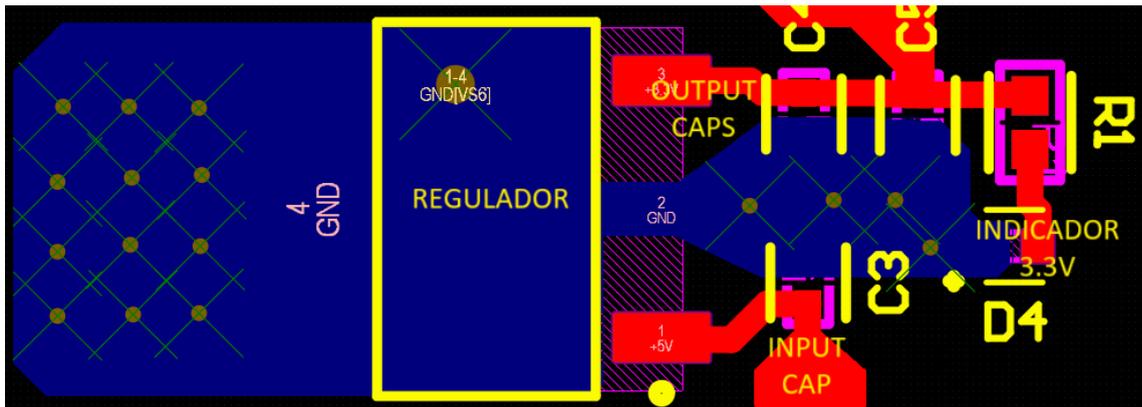


Como se puede observar en nuestro diseño hemos empleado como base el posicionamiento inicial observado en la figura x, intentando mantener todos los bucles de corriente lo más cortos posible cumpliendo con las recomendaciones mencionadas anteriormente.

Regulador 3.3 V

Para el layout del regulador de 3.3V se ha seguido las recomendaciones del datasheet del fabricante, en este el fabricante especifica que debemos conectar los capacitores de entrada y salida los más próximo posible al componente, debemos usar pistas anchas en la entrada y la salida para evitar el efecto de los parasiticos presentes en la PCB.





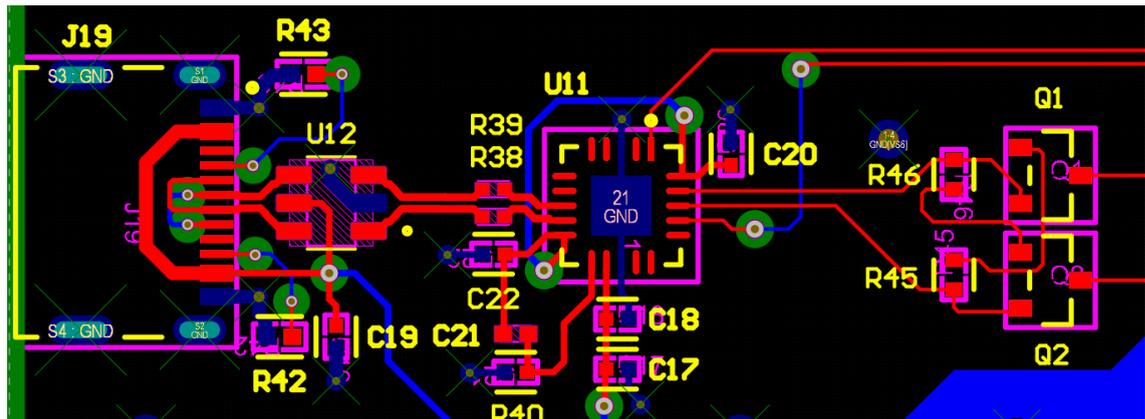
Se puede observar que se ha seguido la recomendación del fabricante además se han añadido vías térmicas para disipar el calor generado por el regulador.

6.2.2 Bridge USB_UART.

La protocolo de comunicación USB requiere de enrutamiento con pares diferenciales, este protocolo tiene más requerimientos como el control de impedancia de 90 ohms en los pares diferenciales, para ello se ha utilizado la calculadora de control de impedancia integrada en Altium para calcular el ancho y espaciado de las pistas necesario. Debido a que estas señales son de alta velocidad se necesita una referencia constante, es por ello que este tipo de comunicaciones se utilizan en pcbs de 4 capas y no de 2 capas.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Top Ref	Bottom Ref	Width (W1)	Trace Gap...	Impe...	Devia...	Delay...
	Top Overlay		Overlay										
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.03048mm	3.5							
1	Top Layer		Signal	1oz	0.035mm		✓	4 - Bottom...	0.29009mm	0.11mm	90.01	0.01%	5.789...
	Dielectric 2	7628	Prepreg		0.0994mm	4.4							
2	Layer 1	CF-004	Plane	1oz	0.0152mm								
	Dielectric 1	FR-4	Core		1.265mm	4.8							
3	Layer 2	CF-004	Plane	1oz	0.0152mm								
	Dielectric 3	7628	Prepreg		0.0994mm	4.4							
4	Bottom Layer		Signal	1oz	0.035mm		✓	1 - Top Layer	0.29009mm	0.11mm	90.01	0.01%	5.789...
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.03048mm	3.5							
	Bottom Overlay		Overlay										

En la figura x observamos el manager de apilamiento de capas de Altium en el podemos ver los datos del apilamiento que estamos empleando, a la derecha de esto podemos observar la calculadora de impedancias y los valores de ancho y espaciado de las pistas necesario para llegar a los 90 ohmios.



Como se puede observar en la figura x que muestra el layout, se han colocado lo más cerca posible los capacitores de desacoplo como el C17, C18 y C20, también se ha colocado muy cerca del conector USB C el USBLC6-2SC6, ya que los diodos TVS deben ir colocados lo más cerca posible de los conectores que protegen.

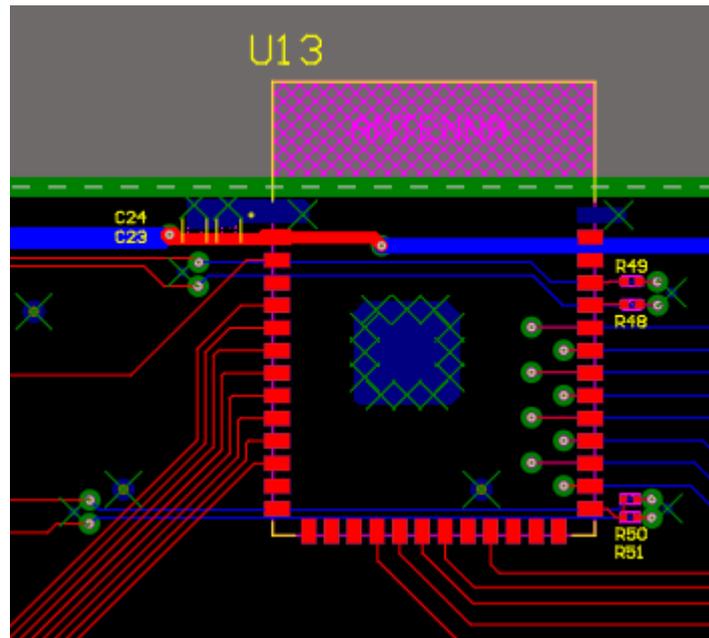
6.2.3 ESP32-S3-Wroom-1-N16.

Para el layout del ESP32 se ha utilizado el documento PCB Layout Design del fabricante Epressif, en el documento se nos muestra como se debe colocar el módulo para su correcto funcionamiento. Según el fabricante el módulo con antena se debe colocar en el borde de la PCB de manera que la antena sobresalga para evitar que la placa interfiera con la antena del módulo, en caso de que no se pudiese posicionar en el borde debemos dejar un área con respecto a la antena en la que no podemos enrutar ni posicionar componentes.

En este caso si se podía posicionar la antena en el borde, por lo que se ha decidido posicionar el módulo de esta manera.

Para las señales digitales de entradas, salidas y comunicaciones como SPI y UART que no tienen una impedancia característica, se ha empleado una impedancia de 50 ohmios debido a que esta impedancia es la que otorga mayor balance entre potencia de transmisión y menor pérdida de la señal, para ello se ha utilizado la herramienta de control de impedancia de Altium.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Top Ref	Bottom Ref	Width (W1)	Impe...	Devia...	Delay...
	Top Overlay		Overlay									
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.03048mm	3.5						
1	Top Layer		Signal	1oz	0.035mm		2 - Layer 1		0.14886mm	49.99	0.02%	6.307...
	Dielectric 2	7628	Prepreg		0.0994mm	4.4						
2	Layer 1	CF-004	Plane	1oz	0.0152mm							
	Dielectric 1	FR-4	Core		1.265mm	4.8						
3	Layer 2	CF-004	Plane	1oz	0.0152mm							
	Dielectric 3	7628	Prepreg		0.0994mm	4.4						
4	Bottom Layer		Signal	1oz	0.035mm		3 - Layer 2		0.14886mm	49.99	0.02%	6.307...
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.03048mm	3.5						
	Bottom Overlay		Overlay									

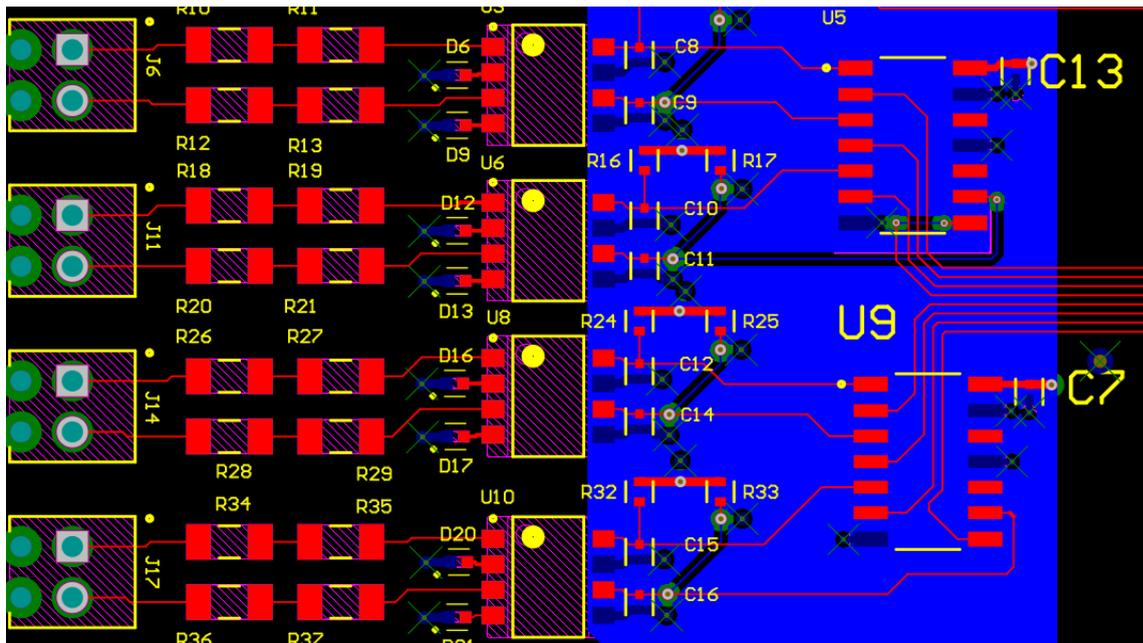


6.2.4 Circuito de entradas y salidas.

Para el posicionamiento del circuito de entradas y salidas, se ha decidido colocar a la izquierda del microcontrolador el circuito de entradas junto a la alimentación para colocar una salida de tensión a 24V para alimentar los sensores y el circuito de programación. Mientras que el circuito de salidas se ha decidido colocar en la parte derecha de la placa junto con la conexión ethernet. Se ha dispuesto la PCB de esta manera con el fin de evitar errores de conexión al tener los dos circuitos en posiciones contrarias.

Circuito de entradas.

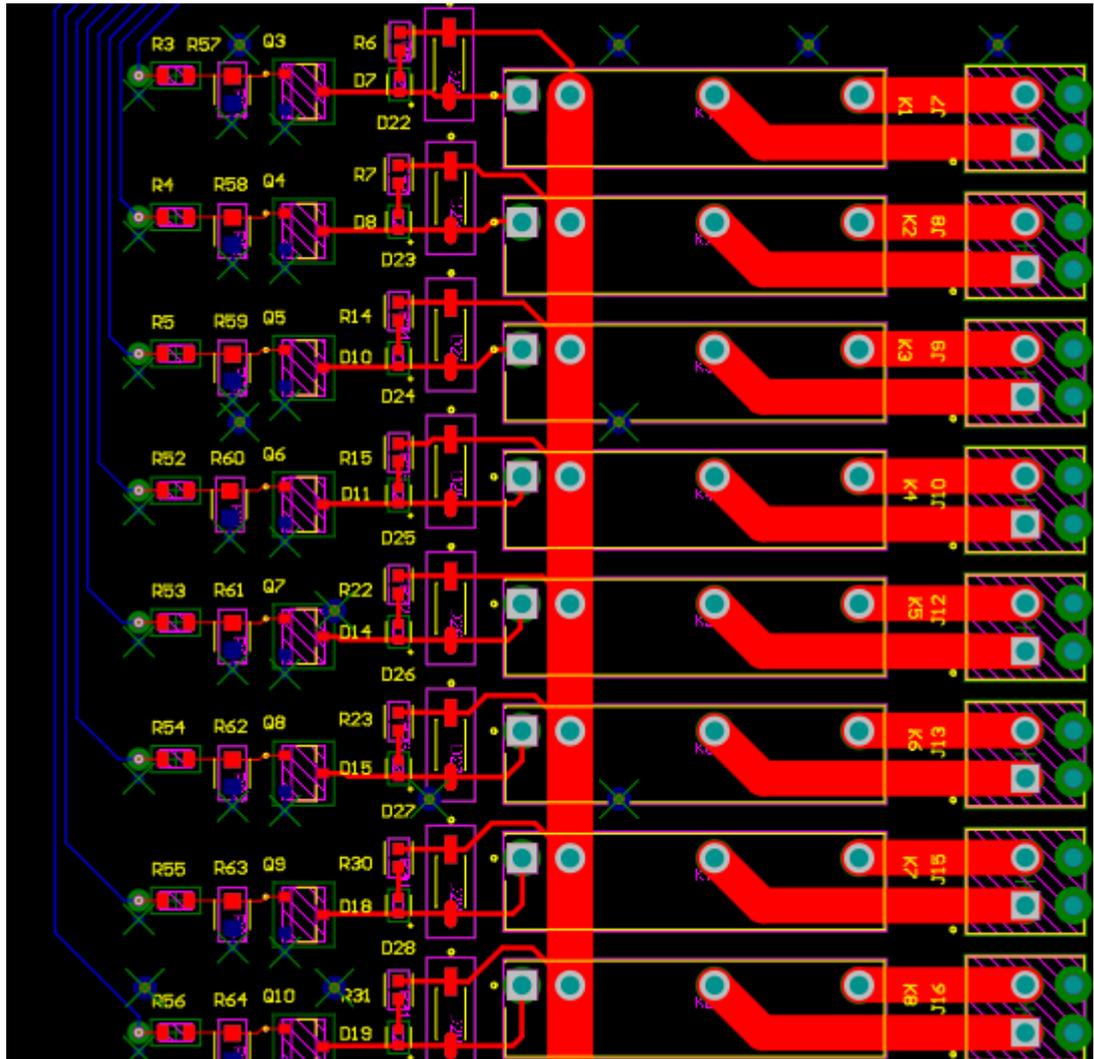
Como se ha explicado, se ha dispuesto el circuito en la parte izquierda de la PCB siguiendo el esquemático electrónico y se han enrutado las pistas con una impedancia de 50 ohms debido a que gran cantidad de circuitos integrados utilizan esta impedancia para las pistas. Debido a la cantidad de puntos de alimentación presentes en esta parte del layout se ha decidido emplear un plano de alimentación.



Como se puede observar en la figura x, los capacitores de desacoplo C7 y C13 se han posicionado lo más cerca posible del circuito integrado.

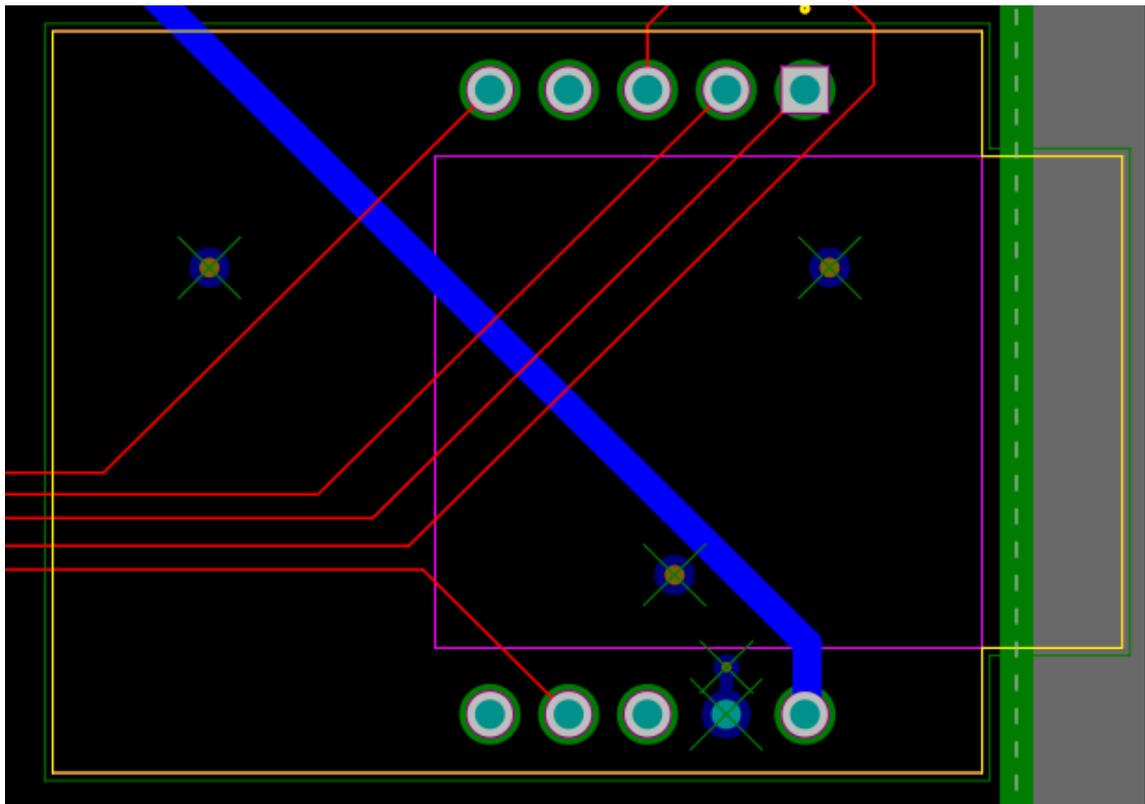
Circuito de Salidas.

El circuito de salidas se ha dispuesto en la parte derecha, en el layout de las salidas a relé debemos tener en consideración la colocación del diodo flywheel, encargado de recircular la corriente generada por el relé a causa de la fuerza electromotriz. Cuando el diodo recircula la corriente se crea un bucle entre el diodo y el relé por donde esta circular, se debe hacer el bucle lo más corto posible para ello el diodo debe colocarse lo más cerca posible del relé. Para la salida del microcontrolador que activa el transistor se ha utilizado una impedancia de 50 ohmios al igual que en el resto de salidas digitales.



6.2.5 Módulo ethernet.

El módulo ethernet ENC28J60 como se ha explicado en el diseño del esquema electrónico, es un módulo de ethernet que se comunica por protocolo SPI. El protocolo SPI no tiene impedancia característica por lo que se ha utilizado una impedancia de 50 ohmios para las pistas.



Como se puede observar en la figura x, el módulo se ha colocado en el borde de la PCB para que el conector RJ45 sobresalga facilitando su conexión.

Capítulo 7. Diseño y fabricación de un prototipo funcional y pruebas funcionales.

En este capítulo explicaremos el diseño del prototipo funcional, de la PCB diseñada y las distintas pruebas realizadas para valorar su funcionamiento y diferentes funcionalidades.

Se ha decidido fabricar un prototipo para probar las distintas funcionalidades del sistema, así como el funcionamiento de los distintos bloques como las entradas o las salidas.

Para ello se ha diseñado un prototipo en una placa de prototipado, estas placas de prototipo son placas para soldar componentes de agujero pasante por ello se han realizado modificaciones al esquemático principal, los principales cambios son en selección de componentes debido a que el sistema desarrollado es mediante componentes de soldadura en superficie.

Para el ESP32, se ha utilizado una placa de desarrollo que lleva instalada el mismo módulo utilizado en la PCB.

En el circuito de entradas se han sustituido los optoacopladores de entrada por otros de agujero pasante de la misma marca, también se ha eliminado el schmitt trigger debido a que este componente no se encontraba en agujero pasante, para el prototipo la señal se invertirá mediante software. También se han sustituido las resistencias y los diodos led por otros de agujero pasante.

En el circuito de salidas, se han sustituido los transistores, el diodo de protección, y las resistencias.

Para el circuito de alimentación se ha sustituido el circuito del regulador de conmutación por la solución alternativa THN10-2411WIR de TracoPower, este componente sustituirá al futuro en el diseño final, debido a que posee certificación de compatibilidad electromagnética.

También se ha prescindido del módulo Ethernet, debido a que su integración únicamente requiere añadir una librería en el código y modificar el programa de conexión mediante la librería wifi.h, sustituyéndola por la librería EthernetESP32.h. Al realizar cambios en los componentes es necesario redimensionar componentes como las resistencias limitadoras de corriente del optoacoplador y transistor.

6.1 ESP32.

El módulo ESP32-S3-Wroom-1-N16 en la placa de prototipo ha sido sustituido por una placa de desarrollo, la placa de desarrollo elegida es la ESP32-DevKit-C que monta el mismo módulo empleado en el diseño de la PCB e incorpora el circuito de programación y el regulador de voltaje a 3.3V

6.2 Rediseño del circuito de entradas.

Para el circuito de entradas del prototipo se ha sustituido el optoacoplador ILD207T por el SFH610A-2 del mismo fabricante ya que tienen características muy similares, también se han sustituido los leds por unos leds de agujero pasante de 3mm. El datasheet del optoacoplador SFH610A-2, nos indica que el Current Transfer Ratio o CTR mínimo para una corriente de 10mA en el led infrarrojo es de 63% con estos datos calculamos la máxima corriente de colector en el estado de saturación.

$$I_{C_{max}} = I_F * CTR \rightarrow I_{C_{max}} = 10mA * 0.63 \rightarrow I_{C_{max}} = 6.3mA$$

Diseño del circuito de entrada del optoacoplador

Como el ESP32 mide el nivel de tensión en las entradas, la corriente no es algo relevante. Calculamos la resistencia para el led infrarrojo, debemos tener en cuenta la caída de tensión en el led indicador.

$$R_{Entrada} = \frac{V_{in} - V_{led1} - V_{led2}}{I} \rightarrow R_{Entrada} = \frac{24v - 1.2v - 2v}{10mA} \rightarrow R_{Entrada} = 2080\Omega$$

Calculamos la potencia disipada por la resistencia.

$$P_{Resistencia} = I^2 * R \rightarrow P_{Resistencia} = 10mA^2 * 2080 \rightarrow P_{Resistencia} = 208 mW$$

La resistencia seleccionada debe ser capaz de soportar mínimo 250 mW, es recomendable que soporte mayor potencia por seguridad, por ello se ha elegido una resistencia de 2k1 y 0.6W.

Diseño del circuito de salida del optoacoplador

Como la corriente en el lado de salida no es importante utilizamos una resistencia pull-up en el colector de 10K. Sin embargo se ha calculado otra resistencia mediante el CTR dado en el datasheet para saturación en caso de que la resistencia de 10k no tenga el efecto deseado.

$$CTR_{Saturación} = \frac{I_C}{I_F} * 100\% \rightarrow CTR_{Saturación} = \frac{2mA}{10mA} * 100\% \rightarrow CTR_{Saturación} = 20\%$$
$$R_{Salida} = \frac{3.3V - V_{CEsat}}{I_F * CTR_{sat}} \rightarrow R_{Entrada} = \frac{24v - 1.2v - 2v}{10mA * 0.2} \rightarrow R_{Salida} = 1600\Omega$$

6.3 Rediseño del circuito de salidas.

Para el circuito de salidas del prototipo se ha sustituido el transistor BC847C,215 de Nexperia por el KSC1815YTA del fabricante Onsemi ya que sus capacidades referidas a la corriente de colector que son capaces de conducir son muy similares, también se han sustituido los leds por unos leds de agujero pasante de 3mm y los diodos de protección 1N5819HW-7-F por los diodos 1N4007E ya que tienen las mismas características.

Los relés no han sido modificados ya que son componentes de agujero pasante y el espaciado de los pines coincide con el espaciado de los pads de la placa de prototipos.

Para diseñar el circuito debemos conocer la corriente que va a circular por el colector, esto tiene el fin de hallar la resistencia de base. debemos extraer del datasheet el voltaje colector emisor en saturación. Es necesario recalculer la corriente de base ya que se ha sustituido el diodo LED como necesitamos una corriente de 10mA en el LED utilizamos una resistencia de 300 ohms.

$$I_{C_{total}} = \frac{V_{relé} - V_{CE_{sat}}}{R_{relé}} + \frac{V_{relé} - V_{led} - V_{CE_{sat}}}{R_{led}} \rightarrow I_{C_{total}} = \frac{5 - 0.1}{138.88} + \frac{5 - 2 - 0.1}{300} I_{C_{total}} = 44.61mA$$

A continuación hallamos la corriente de base, para ello asumimos una ganancia del transistor de 20, aunque en el datasheet tengamos una ganancia mayor generalmente se asume una ganancia de 10 o 20 con el fin de asegurar la saturación.

$$I_C = \beta * I_B \rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} \rightarrow I_B = \frac{44.61mA}{20} \rightarrow I_B = 2.23mA$$

Hallamos la resistencia de base necesaria para conseguir esa corriente, para ello asumimos la mínima tensión de salida del ESP32, según el datasheet del ESP32 la mínima tensión de salida es de 2,64V. También extraemos del datasheet del transistor el voltaje de base emisor en saturación.

$$R_{base} = \frac{V_{salida} - V_{BE_{sat}}}{I_B} \rightarrow R_{base} = \frac{2.64 - 0.766}{2.23mA} \rightarrow R_{base} = 869.95\Omega$$

Debemos seleccionar siempre un valor menor y nunca mayor al valor calculado, en este caso se ha elegido una resistencia de 866 ohms. Adicionalmente debemos añadir una resistencia de tierra en la base del transistor, esta debe ser lo suficientemente grande para no interferir con la resistencia de base.

Resolvemos la malla de base con la nueva resistencia de 100k mediante el teorema de Thevenin, para ello debemos hallar la resistencia equivalente de Thevenin y la fuente de Thevenin. Para hallar la resistencia de Thevenin anulamos la fuente de voltaje y se sustituye por un cortocircuito y también anulamos la carga, quedando las resistencias de base en paralelo.

$$R_{thevenin} = \left(\frac{1}{866} + \frac{1}{100000} \right)^{-1} \rightarrow R_{thevenin} = 858.56\Omega$$

Para resolver la fuente de Thevenin debemos hacer un divisor de tensión, siendo el resultado el voltaje en la resistencia de tierra.

$$V_{thevenin} = V_{salida} * \frac{R_{tierra}}{R_{tierra} + R_{base}} \rightarrow V_{thevenin} = 2.64V * \frac{100000}{100000 + 858.56}$$
$$V_{thevenin} = 2.617V$$

Volvemos a resolver la malla de base con la fuente y resistencia de Thevenin.

$$I_{base} = \frac{V_{thevenin} - V_{BEsat}}{R_{thevenin}} \rightarrow I_{base} = \frac{2.617V - 0.766}{858.56} \rightarrow I_{base} = 2.155mA$$

La diferencia entre la nueva corriente de base calculada y la corriente de base sin la resistencia de tierra es de 0.075mA si calculamos la nueva ganancia, el resultado es 20,7 por lo que podemos asegurar que el transistor se mantiene en saturación.

6.4 Rediseño del bloque de alimentación.

Regulador de 5V

Para reducir el voltaje de 24V a 5V se ha utilizado el regulador THN10-2411WIR, este es un regulador integrado que contiene la mayoría de componentes necesarios para su funcionamiento a excepción de los componentes de filtrado para certificación EMC.

Este regulador de voltaje no necesita ningún componente adicional para su correcto funcionamiento.

Regulador de 3.3V

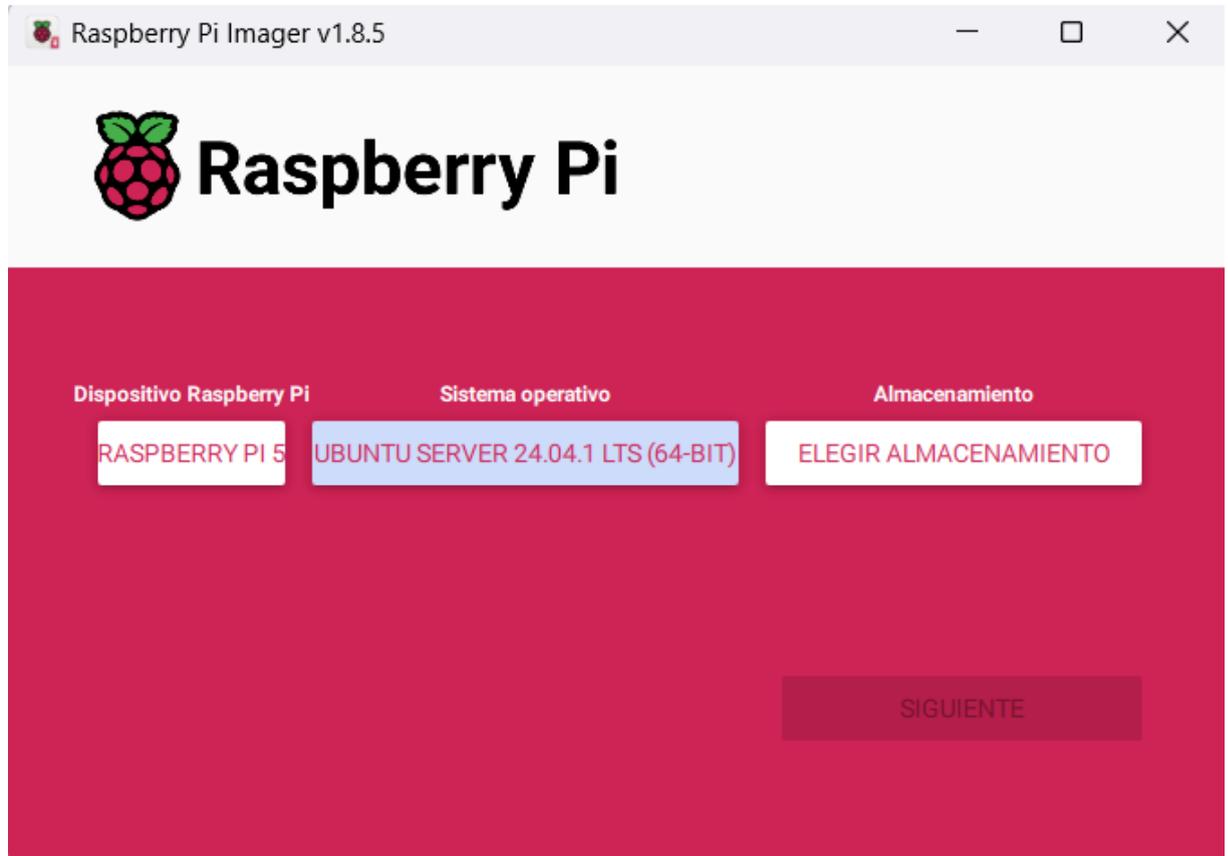
En la placa de prototipo no es necesario incluir un regulador de voltaje que reduzca a 3.3V debido a que la placa de desarrollo ESP32 ya lo incluye.

6.5 Servidor IoT.

Para el servidor IoT se ha decidido utilizar una Raspberry Pi 5, debido a que ya se disponía de la misma. La raspberry Pi es un mini ordenador desarrollado por Raspberry Pi Foundation, este mini ordenador cuenta con un procesador ARM-Cortex A64 de cuatro núcleos que funciona a 2,4GH también cuenta con capacidades WiFi, Ethernet, Bluetooth, salida de video, 4 puertos USB y 40 GPIOs programables. Utiliza tarjetas microSD para almacenar el sistema operativo permitiéndonos la instalación de diferentes sistemas sin la necesidad de utilizar máquinas virtuales, para cargar el sistema el fabricante ofrece la aplicación Raspberry Pi Imager que contiene diferentes sistemas compatibles con las versiones de este ordenador, también existe la posibilidad de instalar los sistemas mediante otras aplicaciones.

La Raspberry Pi es ampliamente utilizada en proyectos debido a sus altas capacidades con un coste asequible, dentro de la domótica y el IoT es muy utilizada debido a la posibilidad de instalar un sistema sin interfaz gráfica lo que reduce su consumo de energía y recursos, además debido a su pequeño se puede colocar en cualquier parte a diferencia de un ordenador.

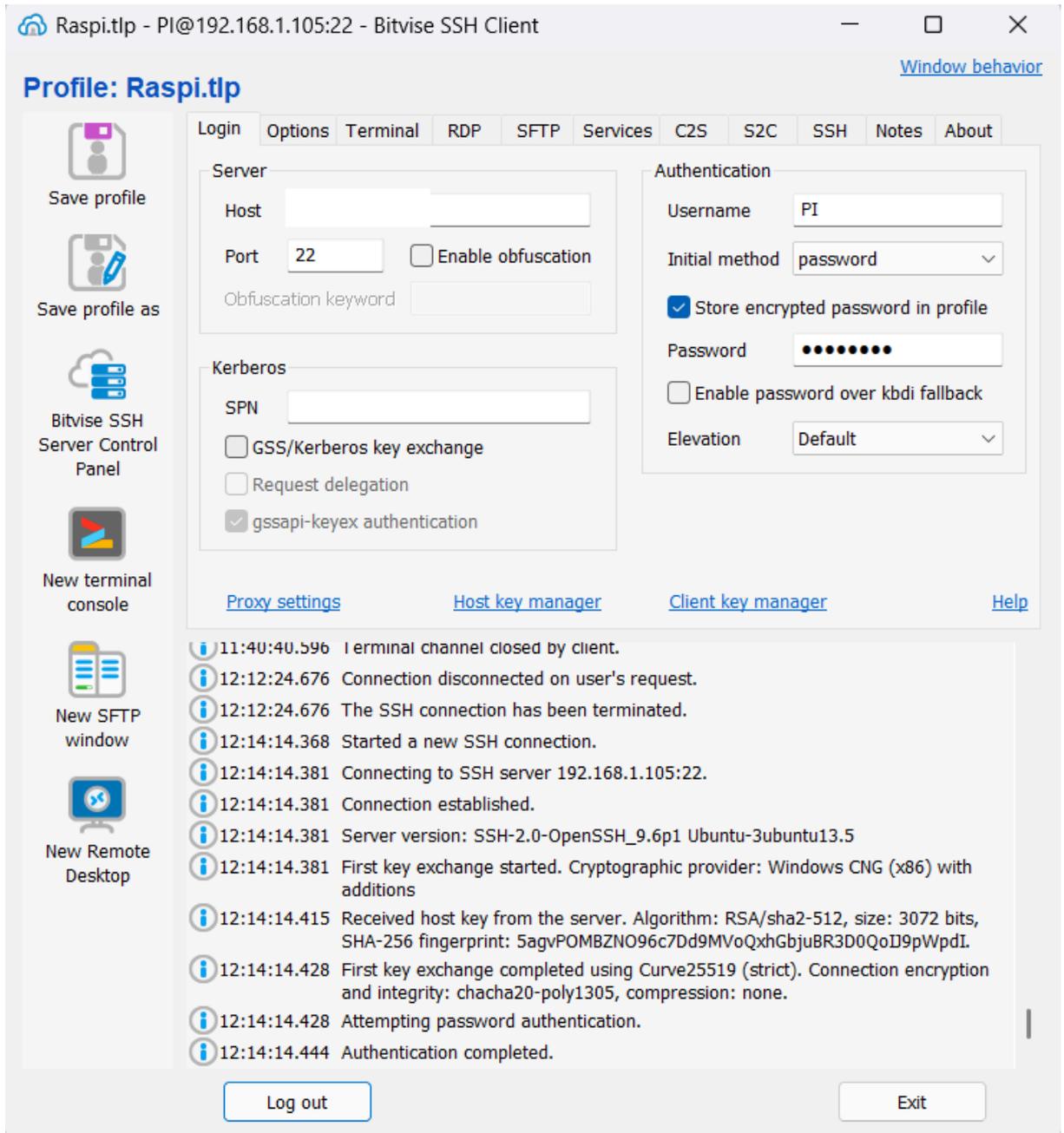
Para el servidor se ha decidido utilizar la distribución Ubuntu Server 24.04 de Linux en su versión long term support, esta es una distribución gratuita muy utilizada en proyectos de electronica y robotica debido a su compatibilidad con distintas herramientas como ROS o Docker, además es la principal distribución de Linux ofrecida por la aplicación de Raspberry Pi Imager a parte de su propio sistema operativo. Para la instalación debemos seleccionar la versión de Raspberry Pi que se posee y el almacenamiento donde se va a grabar, tras esto debemos configurar el sistema añadiendo las credenciales de acceso y credenciales de red.



Una vez instalado en el almacenamiento introducimos la microSD en el puerto correspondiente e instalamos el sistema en el lugar designado. Para esta aplicación se va a utilizar conexión ethernet para tener una mayor velocidad por ello se instala el sistema cerca del router, en caso de que no se requiera la conexión por ethernet se puede utilizar la conexión WiFi.



Una vez encendida podemos acceder a ella a través de conexión SSH, para ello se debe utilizar un software de cliente-servidor en este caso se utiliza BitviseSSH ya que se ha trabajado con él con anterioridad, introducimos la Ip que le ha otorgado el router al servidor y las credenciales de acceso y conectamos.



Una vez conectados podemos acceder al terminal de comandos para instalar las aplicaciones requeridas.

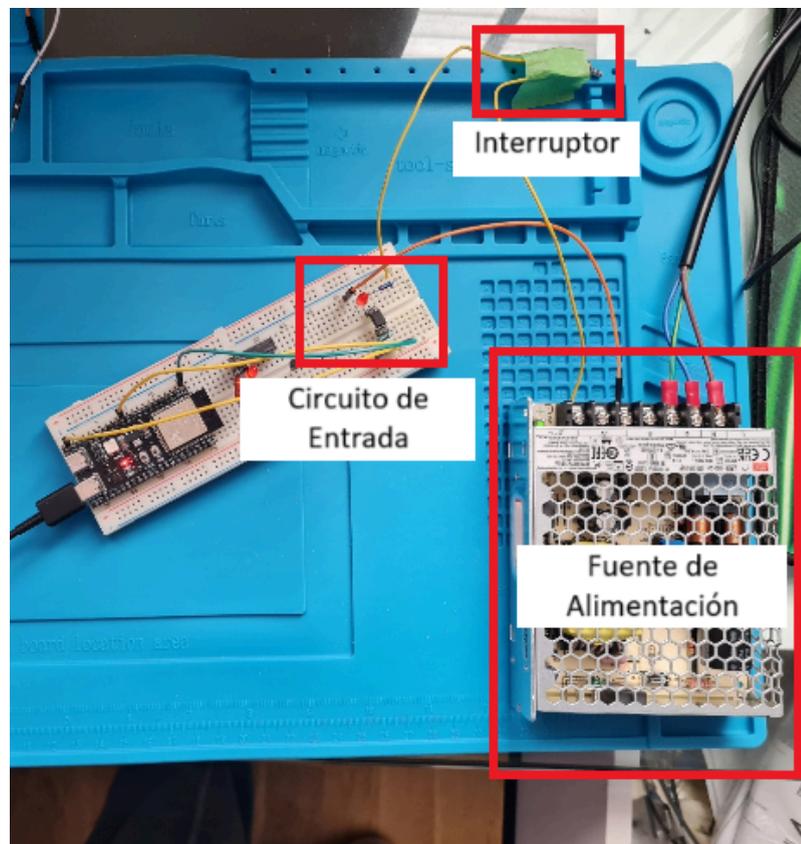
En este caso se ha instalado Docker, esta es una aplicación que permite la creación de contenedores que empaqueta las aplicaciones y todos sus archivos relacionados, se ha seleccionado docker debido a su gran biblioteca de imágenes de aplicación, docker nos permite ejecutar diferentes aplicaciones simultáneas en el mismo sistema operativo. Para facilitar el manejo de docker se ha instalado Docker-compose, una herramienta que facilita la configuración de los contenedores. También se ha instalado Portainer, una aplicación de gestor de contenedores que nos permite la modificación de estos desde fuera del servidor, pudiendo acceder desde un buscador como Google Chrome.

Dentro de Portainer se ha instalado un servidor MQTT y Node-Red para poder manejar el Micro PLC desde una interfaz gráfica creada en Node-Red.

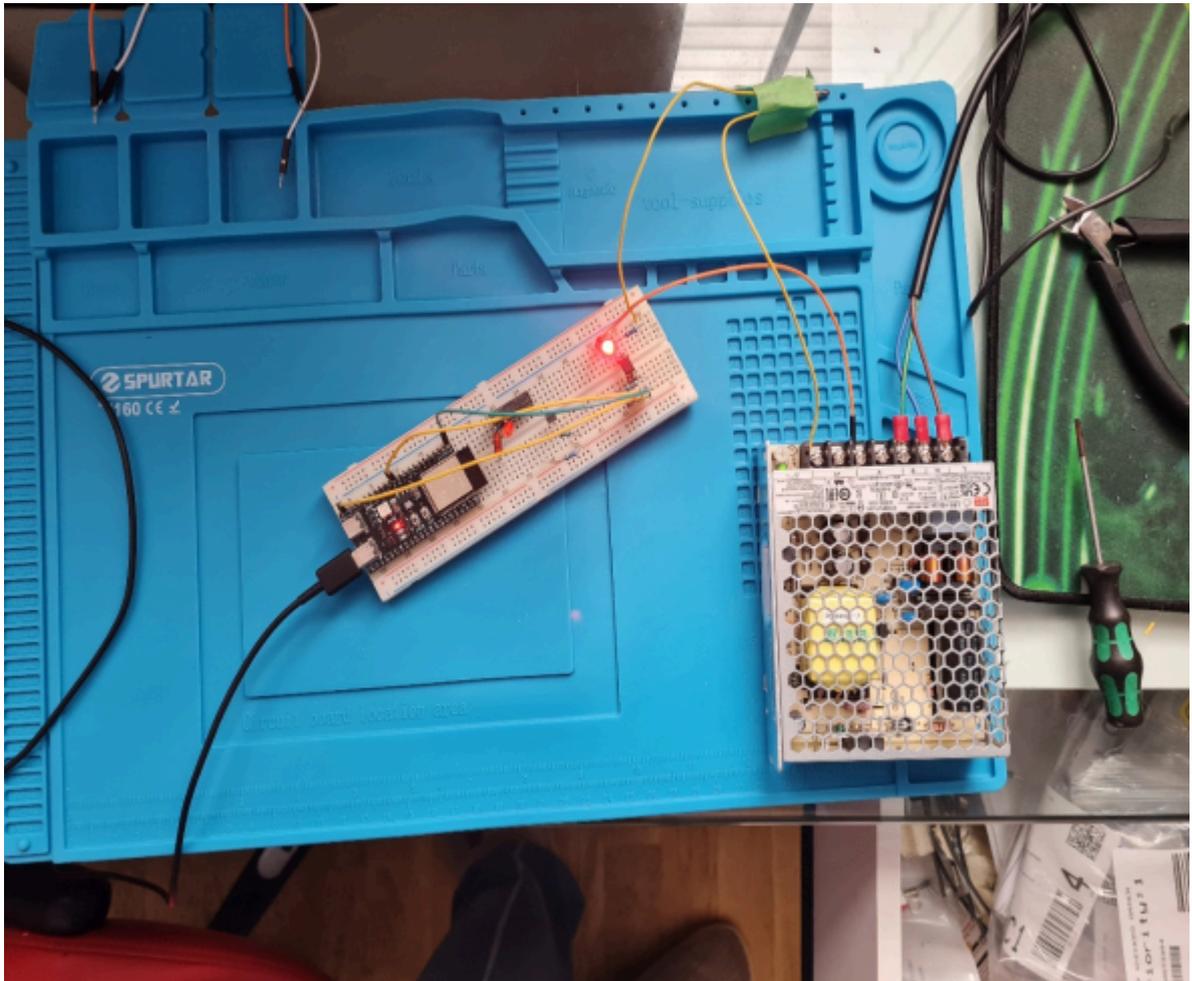
6.6 Pruebas de Validación.

Validación del circuito de entradas.

Para validar el circuito de entradas se ha montado el circuito diseñado en una protoboard y se ha utilizado la fuente de alimentación principal de 24V para simular la entrada de un sensor mediante un interruptor.



Mediante un script generado en Arduino se lee una entrada digital la cual lee un valor alto si no hay señal de entrada y un valor bajo si hay señal de entrada.

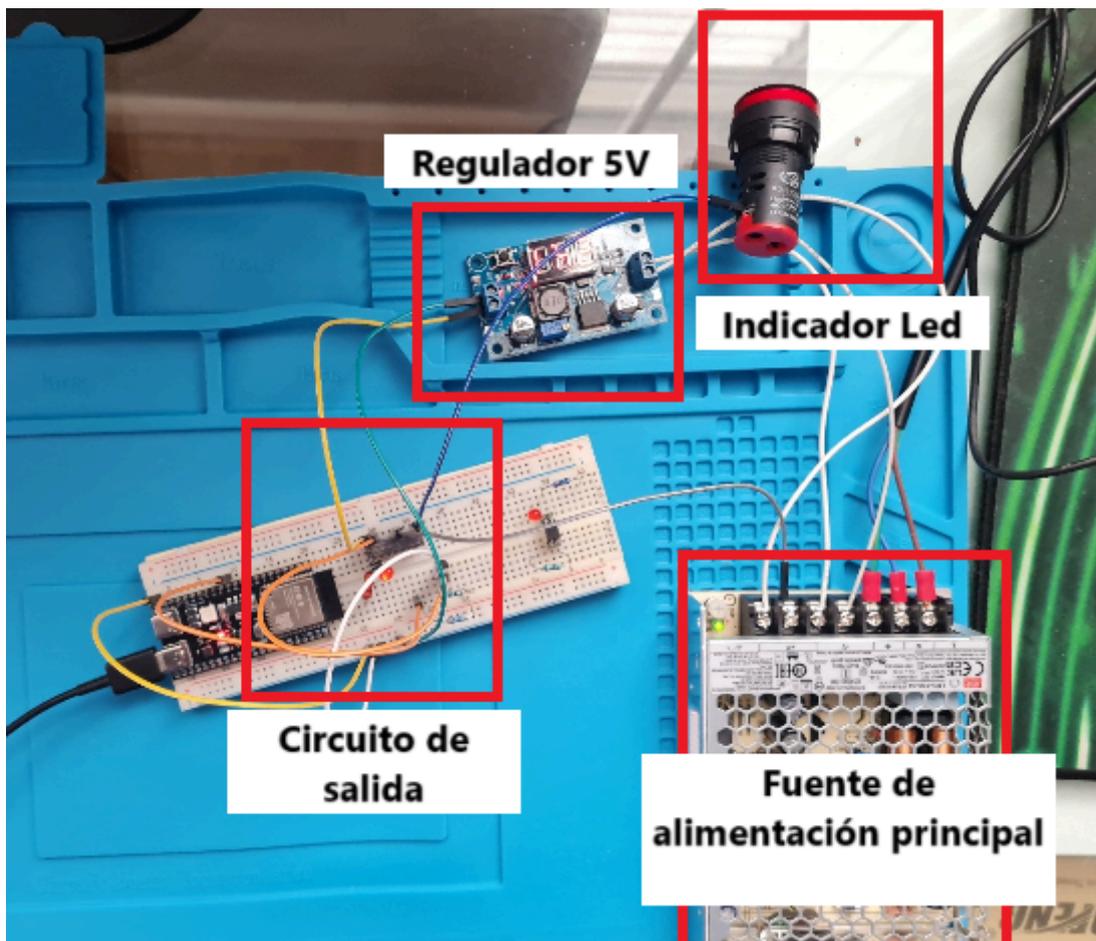


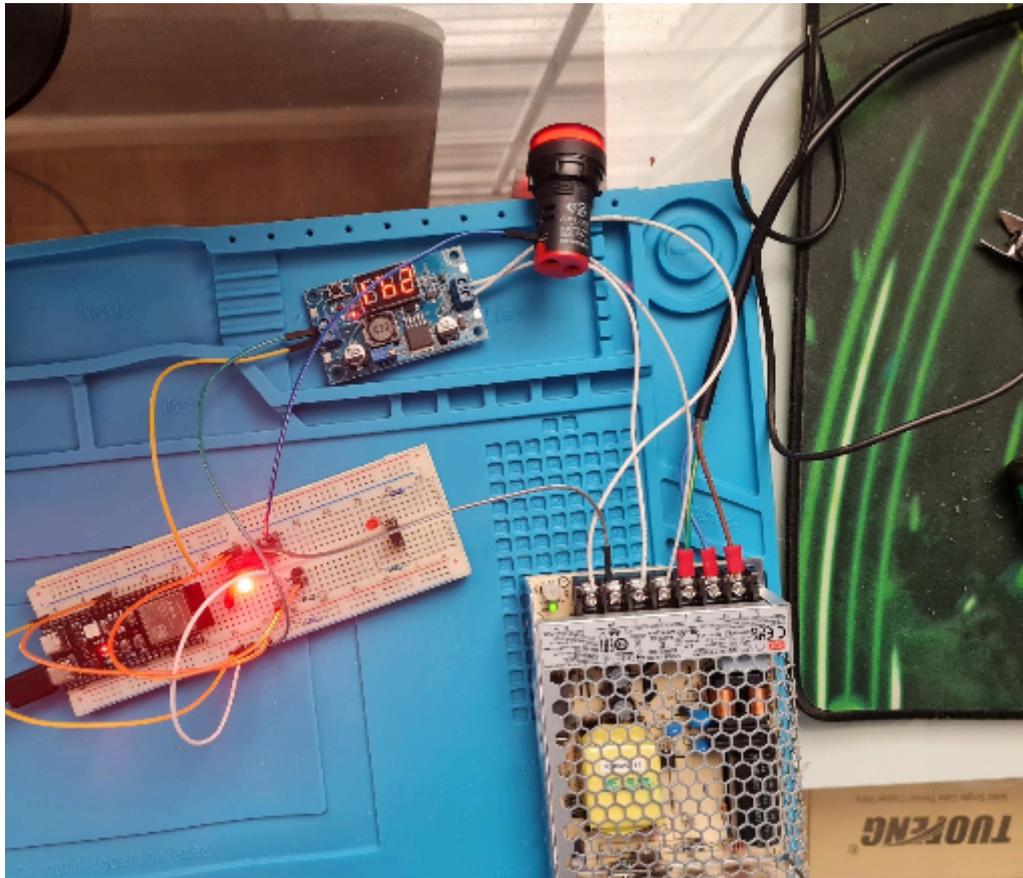
En esta imagen podemos observar como el led indicador se encuentra encendido, indicando que hay señal de entrada

Validación del circuito de salida.

Para validar el circuito de salida se ha montado en una protoboard, como el ESP32 trabaja a 3.3V y los relés trabajan a 5V se ha utilizado la fuente de alimentación principal con un regulador de tensión ajustable para entregar los 5V, como en el transistor la señal de base es enviada por el microcontrolador mientras que la corriente de colector la entrega el regulador de tensión se deben unir las tierras para compartir la referencia.

Se ha cargado un script en el microcontrolador para controlar la salida por el puerto serie, de manera que si envío un 0 por este el relé se apaga y si envío un 1 se enciende, para mostrar su funcionamiento se ha incluido un indicador led de 24V en la salida del relé.

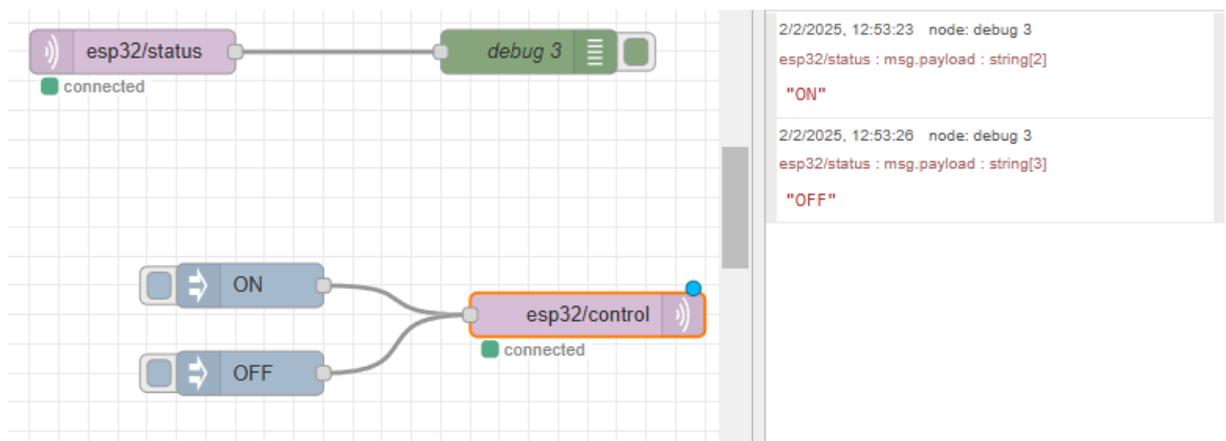




Pruebas de conectividad a MQTT

Para la prueba de conectividad a MQTT se ha utilizado la placa de desarrollo ESP32, para conectarnos al servidor y probar a mandar y recibir mensajes, para ello debemos conectar el ESP32 al WiFi y al servidor MQTT alojado en la Raspberry PI.

Se ha generado un script en Arduino para que cuando el ESP32 reciba un mensaje de On u OFF por un tópico suscrito de MQTT devuelva el valor leído por otro tópico que recibe Node-Red.

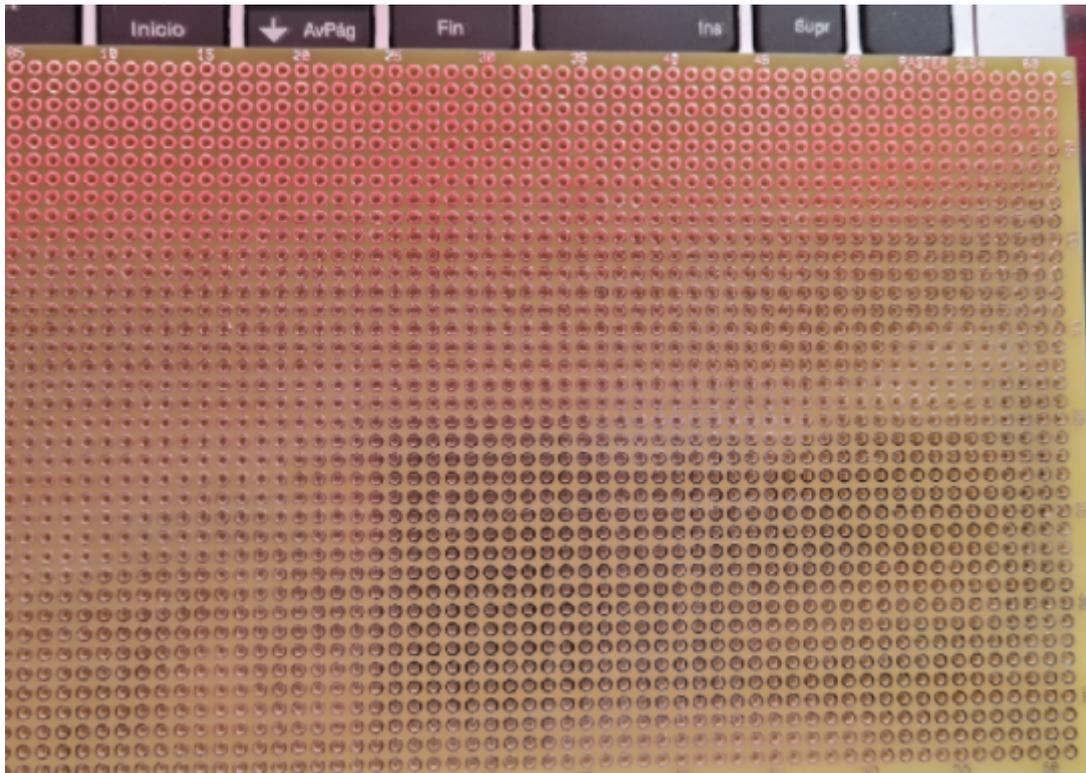


Mediante los pulsadores inyectamos el mensaje de ON y OFF a un tópico de MQTT, ese tópico lo lee el ESP32 y lo devuelve por el tópico con el nodo de debug que lo lee y lo imprime en la pantalla.



6.7 Montaje del prototipo.

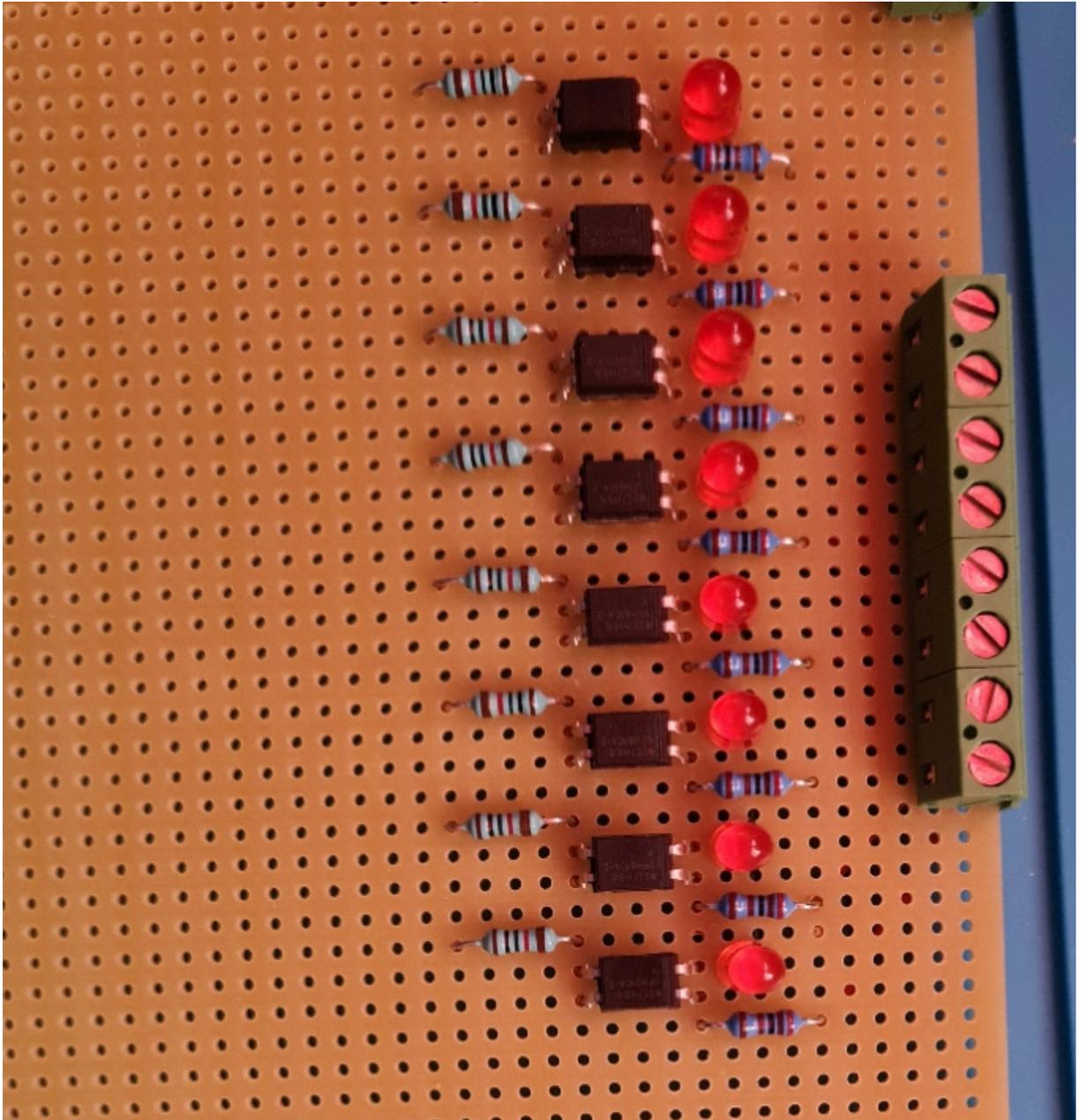
Para el montaje del prototipo se han utilizado, los materiales mencionados en los subapartados 6.1, 6.2y 6.3 para soldar los componentes se ha utilizado una placa de prototipo de agujeros pasantes.



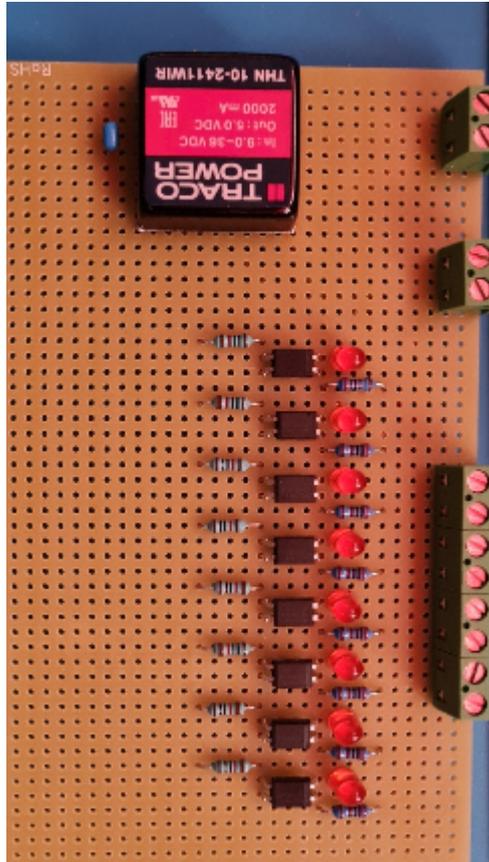
Para soldar los componentes se ha utilizado la estación de soldadura Weller WE1010, además se ha utilizado cable para realizar las conexiones necesarias entre los componentes de la placa.



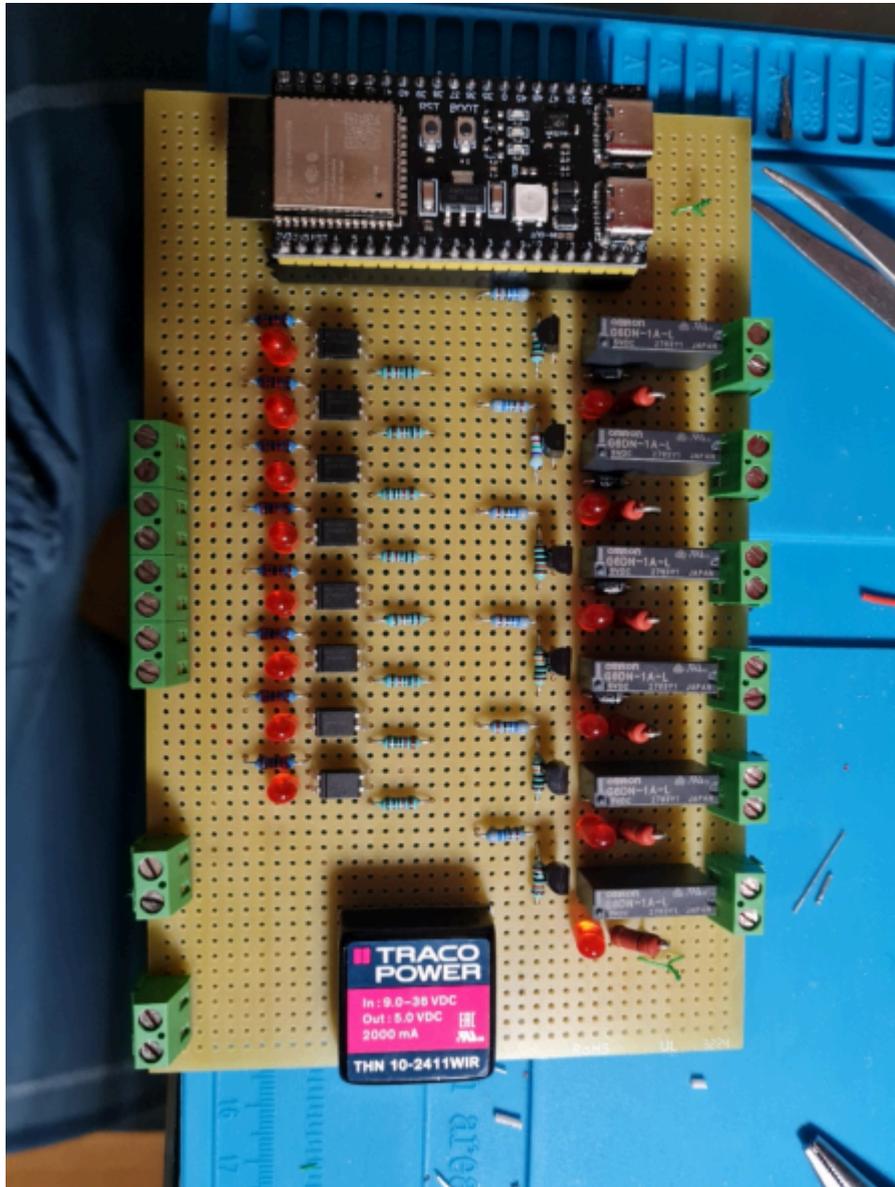
Soldadura del circuito de entradas



Soldadura de fuente de alimentación



Soldadura de circuito de salidas y ESP32



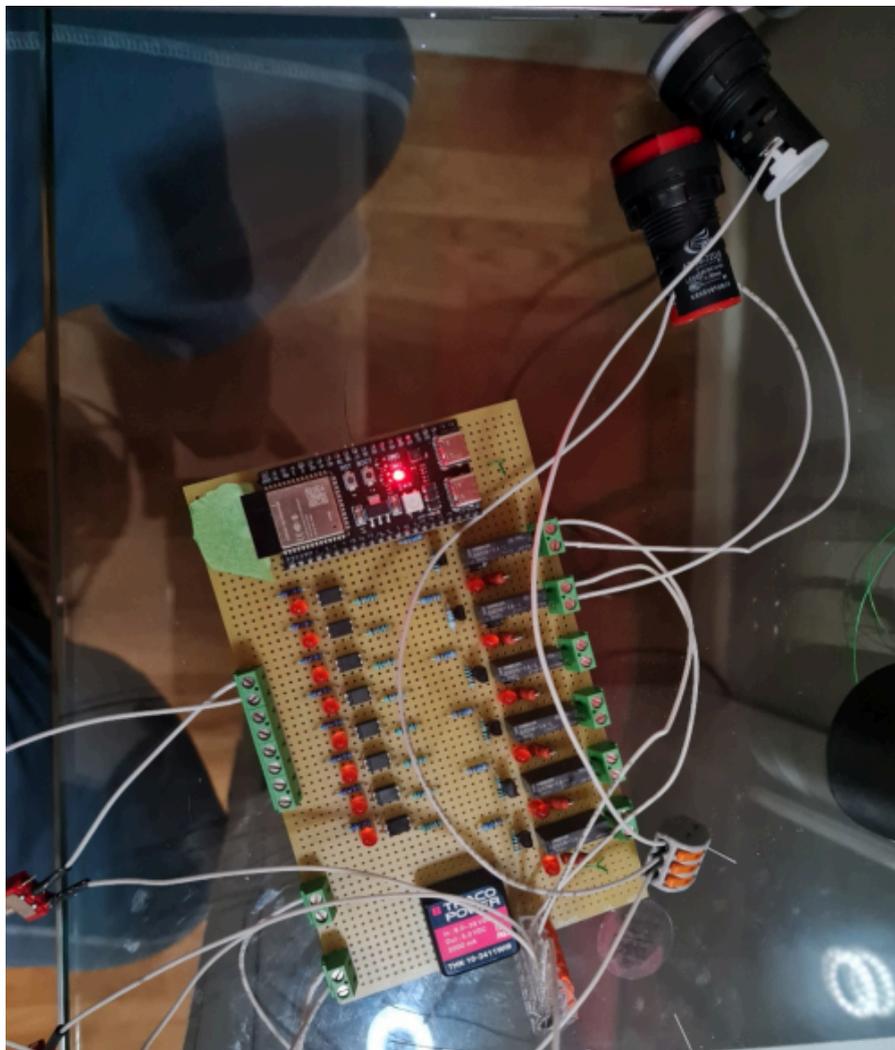
En el prototipo se ha reducido el número de salidas finalmente a seis debido a falta de espacio en la PCB.

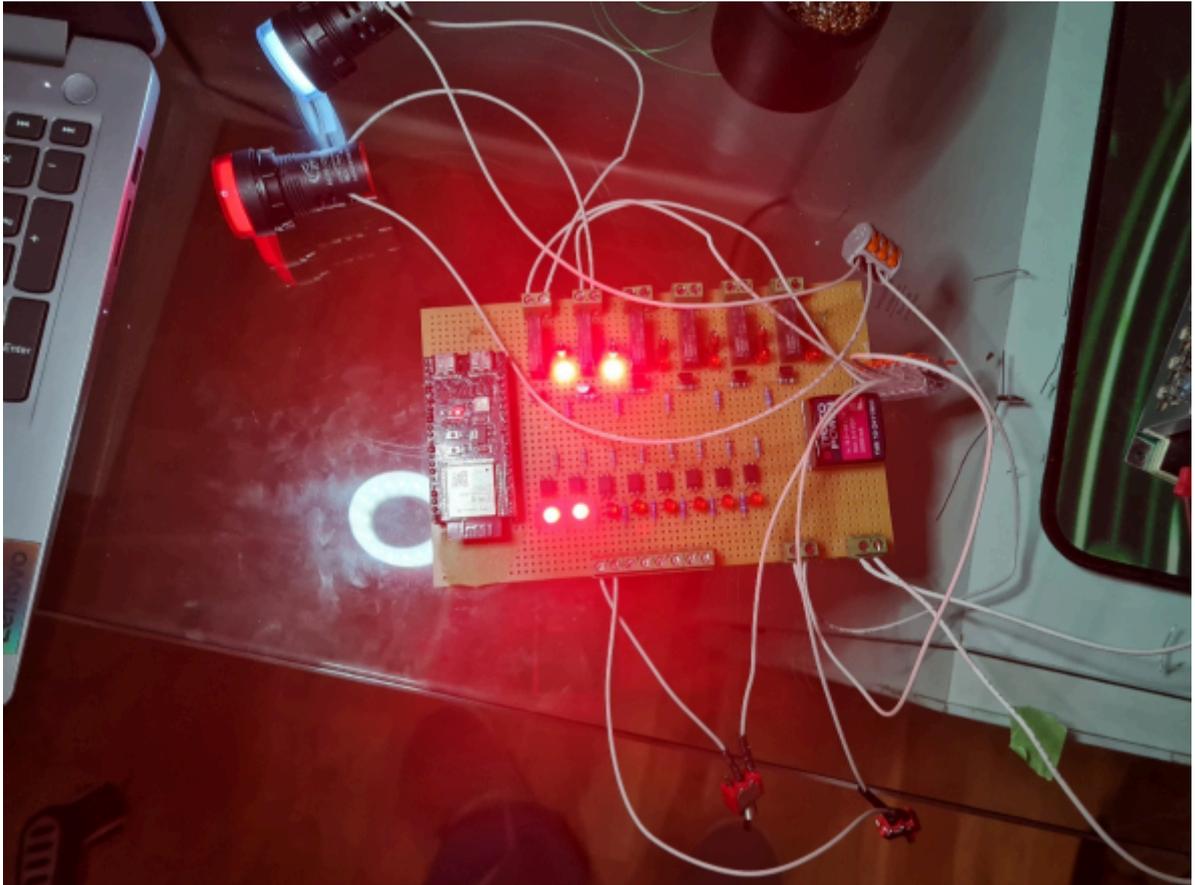
6.8 Pruebas de validación.

Para las pruebas de validación se han utilizado únicamente dos entradas y dos salidas debido a que el circuito es el mismo para todo el bloque, si una parte funciona el resto también

Prueba de circuito de entradas y salidas.

Para esta prueba se ha generado un script, que lee dos entradas y si las dos están activas se activan dos salidas.





Capítulo 8. Plan de negocio.

8.1 Descripción del producto.

El producto desarrollado se trata de un sistema de automatización de bajo costo para el sector de la domótica, se ha diseñado para facilitar la accesibilidad a la domótica de bajo presupuesto. El producto está basado en el microcontrolador ESP32-S3-Wroom-1-N16, presenta 8 entradas optoacopladas de 24V y 8 salidas a relé capaces de manejar 230V y 5A de corriente alterna, el producto es compatible con Home Assistant una de las plataformas de domótica más empleada en el mundo open source gracias a su add-on de ESP Home podemos incluir nuestro dispositivo dentro de esta aplicación, también es compatible con MQTT un protocolo de comunicación IoT basado en la topología de publicador-suscriptor permitiendo la comunicación entre diferentes productos. La compatibilidad con estas aplicaciones permite al usuario adaptar el hardware y software completamente a sus necesidades.

La idea de este producto surge debido a la gran demanda de productos de domótica asequibles que no dependan de plataformas propietarias para las cuales hay que invertir una gran cantidad de dinero. Las soluciones presentes en el mercado pertenecientes a empresas propietarias restringen la posibilidad de personalización y se necesitan técnicos especializados para su instalación y manejo lo que conlleva un desembolso de dinero mayor, el objetivo de la empresa es ofrecer un producto accesible para todos los públicos, compatible con el ecosistema open source, fácil de programar y que permita al usuario tener un control completo sobre su instalación.

El target principal de este producto son entusiastas de la domótica, personas con mínimo conocimiento de programación que buscan una solución de bajo coste totalmente personalizable y programable con un IDE de programación de su preferencia. También para tareas de automatización de tareas como encendido y apagado de luminarias en pequeñas empresas.

Nuestro producto cubre las necesidades de ser un producto económico y compatible con plataformas open source.

8.2. Análisis del mercado y la competencia.

El mercado de la domótica ha experimentado un importante crecimiento en los últimos años, en concreto en España se espera que este año el 20% de los hogares cuenten con sistemas domóticos. En 2023 se valoró el sector mundial de la domótica en un valor de 82100 millones de dólares y se espera que alcance un valor de 903940 millones de dólares para el 2033.

El sector de la domótica open source ha ganado usuarios debido a la demanda de soluciones personalizables y los altos costes de los sistemas propietarios, aunque no es posible conocer el tamaño del mercado de la domótica open source, gracias a los blogs como el de Home Assistant y canales de información como el canales de Youtube dedicados a este sector podemos decir que el mercado de esta tecnología es amplio.

Los factores de éxito en el mercado de la domótica open source son los siguientes:

- **Dificultad de uso:** A diferencia de los sistemas propietarios que necesitan técnicos especializados para su instalación, los sistemas open source permiten poner en marcha el sistema en unos minutos.
- **Comunidad:** El desarrollo de una comunidad de usuarios que contribuyan a la mejora continua del producto.
- **Compatibilidad y flexibilidad:** Ofrecer un producto que se integre con distintos dispositivos y plataformas, permitiendo así al usuario la personalización del sistema de acuerdo a sus necesidades.
- **Soporte:** Proporcionar al usuario una documentación detallada para la integración del sistema y la resolución de posibles errores, así como ofrecer un código fuente.
- **Costes:** Los costes son un factor determinante en el sector open source pues para hacerlos accesibles no deben tener un precio muy elevado.

El mercado de la domótica open source cuenta con varios distribuidores que ofrecen productos similares. A continuación realizaremos el análisis de los principales competidores.

1. Arduino Opta

Arduino opta es un micro PLC basado en STM32 con capacidades IoT, para aplicaciones del Hogar y pequeña industria

- **Características:** Conectividad WiFi y Ethernet, 4 salidas de relé de 10A, 8 entradas digitales, compatibilidad con plataformas open source como MQTT y alimentación a 24 voltios de corriente continua.
- **Precios:** Arduino Opta WiFi: 194.82€
- **Canales de venta:** Venta online a través de su página web.
- **Fortalezas:** Integración sencilla cuenta con un gran soporte a través de su blog y ofrece una amplia gama de módulos de expansión.
- **Desventajas:** Precio elevado tanto de la cabecera del controlador como sus módulos de expansión.

2. Shelly

Shelly ofrece dispositivos de automatización de luces, relés y sensores.

- **Características:** Posee su propia aplicación de control integrable en home assistant, cuenta con diferentes productos como dimmers, relés inteligentes, medidores de consumo y sensores de puertas y ventanas.
- **Precios:** Relé Shelly 1: 18,76€, Relés Shelly medidor de potencia: 32,55€
- **Canales de venta:** Venta online a través de su página web o desde distribuidores como Amazon.
- **Fortalezas:** Fácil instalación de sus productos y cuentan con un amplio catálogo de productos
- **Desventajas:** Sus productos dependen únicamente de conectividad WiFi y puede no ser indicado en instalaciones donde la red es inestable o si el sistema está alejado del router.

3. Sonoff

Sonoff ofrece productos WiFi para domótica como relés inteligentes, interruptores, cámaras y enchufes.

- **Características:** Compatibilidad de sus productos con Home Assistant modificando el firmware del producto, tiene un amplio catálogo de productos.
- **Precios:** Sonoff S60 enchufe inteligente: 21.90€, Sonoff Mini-D: 21.99€
- **Canales de venta:** Venta online a través de su página web o desde distribuidores como Amazon y Aliexpress.
- **Fortalezas:** Precios muy competitivos, amplio catálogo de productos y comunidad activa para soporte de sus productos.
- **Desventajas:** En productos antiguos es necesario modificar el producto para hacerlo compatible con Home assistant.

El mercado de hardware para la domótica se encuentra en constante expansión aunque anteriormente estaba monopolizado por sistemas propietarios, con la aparición de software para integración de dispositivos de diferentes fabricantes han ganado terreno las soluciones open source. Esto es debido a ventajas como su personalización, facilidad de integración comunidades de usuarios activos y la gran cantidad de tutoriales y documentación realizados por profesionales formados en el mundo de la domótica.

8.4 Plan de costes y ventas.

Costes de fabricación

Para los costes del producto se deben tener en cuenta los costes derivados del diseño así como los costes derivados de la certificación del producto. Los costes de un proyecto se pueden dividir en costes recurrentes y costes no recurrentes. Los costes no recurrentes son aquellos derivados del proceso de diseño y elaboración de documentación, mientras que los costes recurrentes vienen dados por los materiales necesarios para fabricar 1 unidad de producto.

Costes No Recurrentes			
Mano de obra			
Tarea	Tiempo(h)	Precio(h)	Precio total(h)
Selección de componentes	25	13,16	329,00 €
Diseño	70	13,16	921,20 €
Desarrollo de la documentación Necesaria para la certificación	20	13,16	263,20 €
Certificación			
Legislación de aplicación	Coste de normativa armonizada basica	Coste de ensayos	
Directiva RoHS	1.160€	500€	
Directiva RED	No aplica	-	
Directiva EMC	1.044€	3.000€	
Directiva de Baja Tensión	No aplica	-	
Ensayos de preevaluación		1.000€	
Presupuesto Total	8.217€		

Costes Recurrentes				
Nombre	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
5001	PC TEST POINT	4	0,29 €	1,16 €
EEEFK1V221P	CAP ALUM 220UF 35V	1	0,83 €	0,83 €
EEHZA1H101P	CAP ALUM POLY HYB 100UF 50V	2	1,92 €	3,84 €
CL05A475MO5NUNC	Cap Ceramic 4.7uF 16V X5R ±20% SMD	2	0,31 €	0,62 €
CL05A106MP8NUB8	Cap Ceramic 10uF 10V X5R ±20% SMD	3	0,26 €	0,78 €
CL05B104KB54PNC	Cap Ceramic 100nF 50V X7R ±10% SMD	16	0,02 €	0,35 €
CL05A105KL5NRNC	Cap Ceramic 1uF 35V X5R ±10% SMD	1	0,31 €	0,31 €
SMBJ26A	TVS DIODE 26V 42.1V	1	0,28 €	0,28 €
B340LB-13-F	DIODE SCHOTTKY 40V 3A	1	0,33 €	0,33 €
PDS760-13	Schottky Rectifier 60V 7A	1	1,03 €	1,03 €
VLMG1500-GS08	LED YLW-GRN 0402	18	0,19 €	3,40 €
1N5819HW-7-F	DIODE SCHOTTKY 40V 1A SOD123	8	0,17 €	1,36 €
MF-SM075-2	PTC RESET FUSE 30V 750MA	1	0,36 €	0,36 €
282837-2	Male Header Pitch 5,08 mm	14	0,59 €	8,25 €
217179-0001	CONN RCP USB2.0 TYP C 24P	1	0,79 €	0,79 €
G6DN-1A-L DC5	RELAY GEN PURPOSE SPST 5A 5V	8	1,88 €	15,04 €
7447709101	Inductor	1	2,57 €	2,57 €
SS8050-G	TRANS NPN 25V 1.5A	2	0,29 €	0,58 €
BC847C,215	Small Signal Bipolar Transistor	8	0,33 €	2,64 €
RC0402FR-071KL	RES 1K OHM 1% 1/16W	10	0,01 €	0,07 €
LM2596SX-5.0/NOPB	IC REG BUCK 5V 3A	1	5,76 €	5,76 €
TL1963A-33DCYR	Single Output LDO 3.3V	1	2,72 €	2,72 €
ILD207T	Optocoupler	4	1,33 €	5,32 €
FT231XQ-R	IC USB SERIAL FULL UART 20QFN	1	2,34 €	2,34 €
USBLC6-2SC6	Trans Voltage Suppressor Diode 5V	1	0,36 €	0,36 €
ESP32-S3-WROOM-1-N16	No Description	1	3,48 €	3,48 €
ENC28J60-H	ENC28J60 Ethernet Control Interface	1	15,80 €	15,80 €

Fabricación de la PCB		5	4,62 €	23,11
Carga de máquinas Pick & Place(Solo 1 vez)				78,00 €
Total				162,99 €
Coste de materiales				84,99 €

Mediante el costo de producción de una unidad de producto podemos calcular el precio de venta, para ello al costo de producción le añadimos el porcentaje de beneficio que queremos obtener. Además a este precio debemos añadir el IVA para obtener el precio de venta al público.

Precio de venta del producto	171,40 €
Precio de venta del producto sin IVA	141,65 €

Debemos tener en cuenta que a mayor tirada de producción menor será el coste de la misma, esto se debe a que los distribuidores de componentes electrónicos reducen los precios a partir de ciertas cantidades de productos por eso mismo si hacemos 500 unidades los materiales serán más baratos que si solo hacemos 100.

Gastos derivados de la operación.

A continuación debemos hacer un estudio de los gastos derivados de la operación del negocio, esto nos ayuda a calcular el número necesario de unidades vendidas mensualmente para que el negocio no opere en pérdidas

Como el negocio se encuentra en la etapa inicial, debemos mantener los gastos mensuales bajos para ello emplearemos estrategias como:

- Evitar alquileres de oficinas, como el principal canal de distribución será online podemos utilizar oficinas virtuales o espacios de coworking de esta manera podemos reducir uno de los principales gastos.
- Utilizar las redes sociales y el posicionamiento online como medio de marketing, a día de hoy no es necesario invertir en costosas campañas de publicidad.
- Contratación de una gestoría encargada de asuntos fiscales como declaración de la renta y pago de impuestos.

Gracias a esto los únicos gastos mensuales que tendremos serán las nóminas, licencia de Altium, servicio de posicionamiento de páginas web de Google y el servicio externo de contabilidad, recursos humanos e IT.

En cuanto al personal necesario, se necesitará un ingeniero electrónico con conocimientos de diseño de PCBs para la mejora y diseño de productos y comerciales encargados de expandir la cartera de clientes, el objetivo de estos últimos es dar a conocer el producto en pequeñas empresas para tareas como automatización de luminarias.

Teniendo en cuenta todos los gastos fijos como las nóminas, licencias y servicios, y los costes variables derivados de la producción podemos calcular la cantidad de producto que se debe vender para alcanzar el punto de equilibrio. El punto de equilibrio en una empresa es el momento en el que los gastos se igualan a los ingresos, a continuación calcularemos el punto de equilibrio de la empresa.

Costes Fijos Mensuales	
Descripción	Importe
Nóminas	2.734,58 €
Posicionamiento de pagina web	200,00 €
Licencias	370,00 €
Servicios de gestoria	100,00 €
Total CF	3.404,58 €

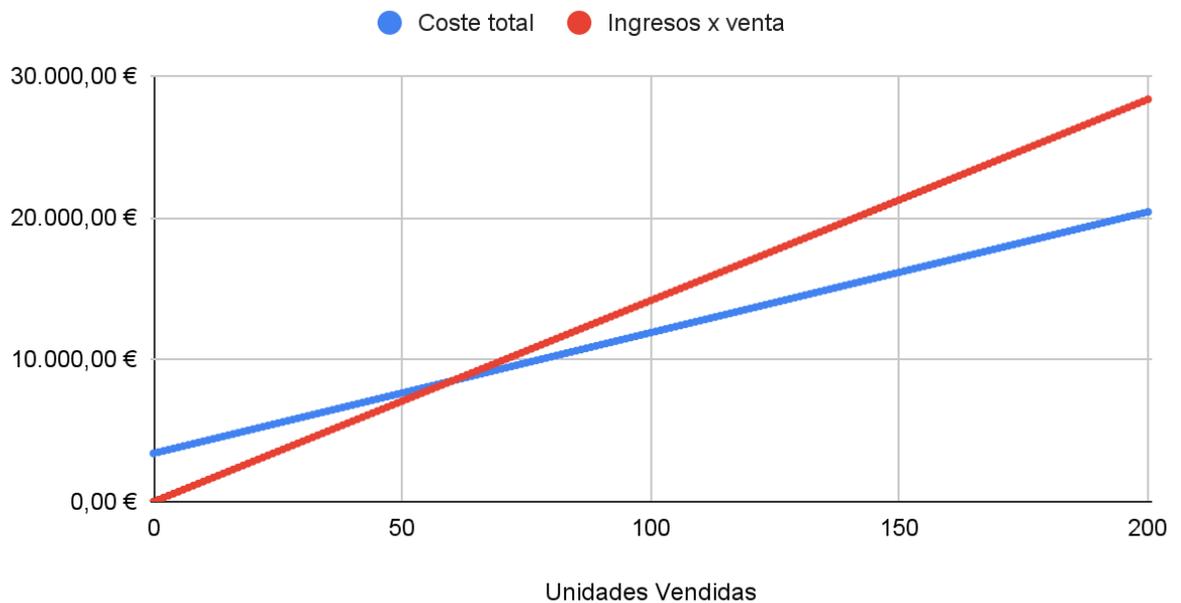
Costes Variables x unidad	
Descripción	Importe
Coste de materias primas	84,99 €
Total CV	84,99 €

Para calcular la cantidad de equilibrio y el ingreso de equilibrio debemos dividir los costes fijos mensuales totales entre el precio de venta por unidad menos el coste variable total y para obtener el ingreso de equilibrio debemos multiplicar la cantidad de equilibrio por el precio de venta.

Cantidad de equilibrio	61
Ingreso de equilibrio	8.640,85 €

Estos valores también pueden obtenerse de manera gráfica, mediante una gráfica que muestre los costes fijos y los costes variables para un rango de ventas, el punto de equilibrio es la intersección entre las dos rectas.

Punto de equilibrio gráfico



Para poder operar sin pérdidas se deben vender 61 unidades mensualmente, este punto debe alcanzarse en el primer año del negocio si no se produce ningún contratiempo. Si bien es recomendable alcanzar la cantidad de equilibrio en un tiempo determinado, este hito depende de diversos factores como el sector del negocio, el target y el precio.

A continuación se genera un flujo de caja estimado con la suposición de alcanzar el equilibrio operativo en el primer año del negocio, para ello suponemos que se alcanza este punto en el onceavo mes de la empresa, para ello se prepara un presupuesto mensual con los gastos y ventas a partir del cual se genera el flujo de caja.

Presupuesto												
Mes	E	Feb	Mzo	Abr	My	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
Ventas												
Precio de Venta	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €	171,40 €
Cantidad	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	61	65
Ventas	6.856,02 €	7.198,82 €	7.541,62 €	7.884,42 €	8.227,23 €	8.570,03 €	8.912,83 €	9.255,63 €	9.598,43 €	9.941,23 €	10.455,4 €	11.141,0 €
Compras												
Precio de Costo	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €	84,99 €
Cantidad	300	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0
Total Compras	25.575,6 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	25.497,6 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Stock												
Cantidad inicial por mes	300	260	218	174	128	80	330	278	224	168	110	49
Impuestos												
IVA soportado en compras	5.370,88 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	5.354,50 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
IVA recaudado en las ventas	1.439,76 €	1.511,75 €	1.583,74 €	1.655,73 €	1.727,72 €	1.799,71 €	1.871,69 €	1.943,68 €	2.015,67 €	2.087,66 €	2.195,64 €	2.339,62 €
IVA a pagar	-3.931,1 €	1.511,75 €	1.583,74 €	1.655,73 €	1.727,72 €	-3.554,7 €	1.871,69 €	1.943,68 €	2.015,67 €	2.087,66 €	2.195,64 €	2.339,62 €

Impuesto de sociedades (15% el primer año)	0	0	0	0	0	0	5.050,07 €	0	0	0	0	0
Cuota de autónomo (reducida el primer año)	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €	80,00 €
Licencias												
Altium	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €	370,00 €
Nóminas	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €	2.734,58 €
Publicidad												
Posicionamiento SEO	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €
Servicios												
IT, RRHH y contabilidad externos	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €

Para la elaboración del presupuesto se ha supuesto un crecimiento en las ventas de un 5% hasta llegar al punto de equilibrio en el mes de noviembre, se ha presupuestado la compra del material con el objetivo de tener existencias para cubrir las ventas comprando el material con un mes de antelación ante posibles inconvenientes producidos por el fabricante. Para las nóminas se ha calculado el coste total de las mismas teniendo en cuenta el IRPF y las cotizaciones a la seguridad social, se han calculado a partir del sueldo bruto utilizando una herramienta del banco Santander.

El impuesto de sociedades se puede abonar en pagos fraccionados o en un único pago, en este supuesto se ha decidido abonar en un único pago, las empresas de nueva creación tienen un tipo reducido del 15% aplicado sobre el beneficio neto de una empresa y se abona los 20 primeros días del mes de Julio.

A partir de este presupuesto preliminar podemos generar el flujo de caja para este caso específico, este se muestra a continuación.

<h1>Flujo de Caja</h1>												
Mes	E	Feb	Mzo	Abr	My	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
Ingresos												
Saldo Inicial	30.000,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	23.969,5 €	0,0 €	5.762,6 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €
Ventas	6.856,0 €	7.198,8 €	7.541,6 €	7.884,4 €	8.227,2 €	8.570,0 €	8.912,8 €	9.255,6 €	9.598,4 €	9.941,2 €	10.455,4 €	11.141,0 €
Total Ingresos	36.856,0 €	7.198,8 €	7.541,6 €	7.884,4 €	8.227,2 €	32.539,5 €	8.912,8 €	15.018,2 €	9.598,4 €	9.941,2 €	10.455,4 €	11.141,0 €
Gastos												
Compras	25.575,6 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	25.497,6 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €
Impuestos	0,0 €	-3.851,1 €	1.591,8 €	1.663,7 €	1.735,7 €	1.807,7 €	1.575,3 €	1.951,7 €	2.023,7 €	2.095,7 €	2.167,7 €	2.275,6 €
Licencias	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €	370,0 €
Nóminas	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €	2.734,6 €
Publicidad	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €	200,0 €
Servicios	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €	100,0 €
Total Gastos	28.980,2 €	-446,5 €	4.996,3 €	5.068,3 €	5.140,3 €	30.709,9 €	4.979,9 €	5.356,3 €	5.428,3 €	5.500,3 €	5.572,2 €	5.680,2 €

Flujo de Caja Neto	7.875,8 €	7.645,4 €	2.545,3 €	2.816,1 €	3.086,9 €	1.829,6 €	3.933,0 €	9.661,9 €	4.170,2 €	4.441,0 €	4.883,2 €	5.460,8 €
Ganancias	7.875,8 €	15.521,2 €	18.066,5 €	20.882,6 €	23.969,5 €	1.829,6 €	5.762,6 €	9.661,9 €	13.832,1 €	18.273,1 €	23.156,3 €	28.617,1 €

La financiación inicial del negocio se puede calcular a partir del flujo de caja, en este caso si restamos los gastos totales a las ventas del primer mes, se observa un descubierto de 22.124€, este es el aporte inicial que se necesita para comenzar a operar. Los meses en los que se producen pérdidas se cubren con las ganancias de otros meses para evitar un flujo negativo. Al reducir al mínimo los costes de operación si operamos cerca del punto de equilibrio con esa inversión inicial se puede hacer frente a los gastos imprevistos

Para aumentar el beneficio percibido por la venta del producto se pueden reducir costes de producción integrando el módulo Ethernet en la PCB, este módulo tiene un coste de 15€ por unidad sin embargo los componentes que contiene no superan los 5€, de esta manera reducimos el coste de producción en 10€, si mantenemos el precio de venta actual esto supondría un aumento de un 10% del beneficio percibido.

Capítulo 9. Conclusiones.

Se ha conseguido desarrollar un prototipo funcional con capacidades para domótica mediante IoT, y se han realizado pruebas de validación exitosas, aunque se han encontrado diferentes problemáticas al utilizar un software nuevo como es Altium se han conseguido subsanar de manera exitosa, por ende podemos considerar que el proyecto ha sido un éxito logrando los objetivos propuestos considerando el proyecto un éxito.

Bibliografía

- <https://www.tokioschool.com/noticias/internet-de-las-cosas-evolucion/>
https://www.gotoiot.com/pages/articles/iot_protocols_intro/index.html
<https://www.seika.com.mx/5-lenguajes-de-programacion-para-plc/>
https://www.industrialshields.com/es_ES/industrial-esp32-plc-iot-lp-202401?utm_campaign=CSL+-+Search+-+ES&utm_source=CPC&utm_medium=Google+Adwords
https://www.waveshare.com/esp32-s3-relay-6ch.htm?_SID=U
- <https://internetdelascosas.xyz/articulo.php?id=6802&titulo=Crecimiento-exponencial-El-mercado-de-la-domotica-inteligente-proyecta-alcanzar-los-903940-millones-de-dolares-para-2033#:~:text=El%20mercado%20mundial%20de%20la,durante%20el%20periodo%20de%20previsi%C3%B3n.>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0035>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0030>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0053>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>
<https://resources.altium.com/es/p/complying-with-ipc-standards-for-pcb-design>
<https://resources.altium.com/es/p/bypass-and-decoupling-capacitor-placement-guidelines>
<https://chakray.com/es/open-source-vs-software-propietario-que-tipo-proveedor-elegir-para-mi-empresa/>
<https://store.arduino.cc/en-es/collections/turnkey-solutions/products/opta-wifi>
- https://www.shelly.com/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=createx_shelly_br_and_eu&klar_source=google&klar_cpid=21743549892&klar_adid=714998501660&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA19e8BhCVARIsAlpFMgFLmQ5C8aOd5gPjcs22sD3ionNhYsrewlxyIWp_JgbnlBTic-9MNLcaApFvEALw_wcB
- <https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/81384964/PID2566391.pdf>
- <https://lanzadera.es/wp-content/uploads/2017/08/Guia-8-pasos-para-saber-como-hacer-un-plan-de-negocios.pdf>
<https://www.redeweb.com/articulos/productos-electricos-y-electronicos/>
<https://resources.altium.com/es/p/top-microcontrollers-embedded-systems>
<https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/58382/como-elegir-el-microcontrolador-adecuado-para-su-proyecto/#kryteria-wyboru>
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6851114>
<https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/81384964/PID2566391.pdf>