

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA, CIENCIA Y COMPUTACIÓN (STEAM)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE DISTANCIA Y ALERTA INTELIGENTE EN ENTORNOS MIXTOS

Alumno: D. JORGE LÓPEZ BLANCO

Director: D. DIEGO ORTEGA SANZ

MAYO 2026

TÍTULO: DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE DISTANCIA Y ALERTA INTELIGENTE EN ENTORNOS MIXTOS

AUTOR: JORGE LÓPEZ BLANCO

DIRECTOR DEL PROYECTO: DIEGO ORTEGA SANZ

FECHA: 21 de MAYO de 2026

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Máster desarrolla un sistema electrónico orientado a la mejora de la seguridad en entornos educativos, industriales y logísticos mediante la detección de obstáculos en tiempo real. El principal objetivo es diseñar un producto capaz de advertir al usuario de situaciones de riesgo y mejorar la percepción del entorno.

El sistema está basado en una arquitectura embebida cuyo elemento principal es una Raspberry Pi Pico con microcontrolador RP2040, encargada de procesar la información procedente de dos sensores complementarios: un sensor ToF VL53L1X para distancias cortas y un sensor ultrasónico HC-SR04 para rangos superiores. La lógica de funcionamiento se organiza en zonas de proximidad con distintos niveles de alerta: señal roja y aviso acústico intenso en distancias cortas; señal amarilla y alertas moderadas en distancias intermedias, y señal verde en situaciones seguras. Además, una pantalla LCD muestra en tiempo real la distancia detectada y el estado del sistema.

Durante el desarrollo se aborda el proceso completo de ingeniería de producto: análisis de soluciones existentes, selección de componentes, diseño esquemático, programación del firmware, simulación funcional y diseño de PCB. También se realiza una validación previa a fabricación mediante visualización 3D y comprobación del ruteado. Para el desarrollo del sistema se han utilizado dos softwares: Proteus y Altium Designer.

Además, el trabajo incorpora un estudio de viabilidad comercial en el que se analiza la propuesta de valor, el segmento objetivo, el entorno competitivo y las acciones de marketing, planteando el proyecto como una solución con potencial de evolución hacia un producto real.

Palabras clave: Detección de proximidad, Microcontrolador, Simulación, Placa de Circuito Impreso, Plan de marketing.

ABSTRACT

This Master´s Thesis develops an electronic system aimed at improving safety in educational, industrial and logistic environments through real-time obstacle detection. The main objective is to design a product capable of warning the user about risk situations and enhancing environmental awareness.

The system is based on an embedded architecture whose main element is a Raspberry Pi Pico featuring the RP2040 microcontroller, responsible for processing the information provided by two complementary sensors: a VL53L1X ToF sensor for short distances and an HC-SR04 ultrasonic sensor for longer ranges. The operating logic is organized into proximity zones with different alert levels: a red signal and intense acoustic warning at short distances; a yellow signal and moderate alerts at intermediate distances; and a Green signal in save situations. In addition, an LCD screen displays the detected distance and system status in real time.

During the development, the complete product engineering process is addressed: analysis of existing solutions, component selection, schematic design, firmware programming, functional simulation, and PCB design. A pre-manufacturing validation is also carried out through 3D visualization and routing verification. For system development, two software tools were used: Proteus and Altium Designer.

Furthermore, the Project includes a commercial feasibility study analysing the value proposition, target segment, competitive environment, and marketing actions, presenting the project as a solution with potential to evolve into a real product.

Keywords: Proximity detection, Microcontroller, Simulation, Printed Circuit Board, Marketing Plan.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 11

1.1. MOTIVACIÓN 11
1.2. OBJETIVOS 12
1.3. METODOLOGÍA 13

2. ESTADO DEL ARTE 14

2.1. INTRODUCCIÓN AL ÁMBITO INDUSTRIAL 14
2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ALMACENES 15
2.3. RIESGOS LABORALES EN ALMACENES 16
2.4. MAQUINARIA PRESENTE EN ALMACENES Y SU CONVIVENCIA 17
2.5. SISTEMAS DE ALERTA EN ALMACENES 17
2.6. TECNOLOGÍAS ACTUALES DE DETECCIÓN DE DISTANCIA 17
2.7. MICROCONTROLADORES EN SISTEMAS EMBEBIDOS 19
2.8. PRINCIPALES PLACAS DE DESARROLLO 20
2.9. HERRAMIENTAS DE DISEÑO ELECTRÓNICO ASISTIDO POR ORDENADOR (EDA) 22
2.9.1. PROTEUS 24
2.9.2. ALTIUM DESIGNER 24
2.9.3. OTROS SOFTWARES DE DISEÑO 24
2.10. PERSPECTIVA DE MERCADO 25
2.11. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTRATÉGICO Y DE MERCADO 26

3. DISEÑO DEL SISTEMA 27

3.1. ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA 27
3.1.1. BLOQUE MEDICIÓN DE DISTANCIA 27
3.1.2. BLOQUE DE PROCESAMIENTO 28
3.1.3. BLOQUE DE COMUNICACIÓN DEL ESTADO 29
3.1.4. BLOQUE DE ALIMENTACIÓN 29
3.2. INTERFAZ DEL SISTEMA 30
3.2.1. INTERFACES FUNCIONALES ENTRE BLOQUES 30
3.2.2. INTERFAZ ENTRE EL BLOQUE DE MEDICIÓN Y LA UNIDAD DE PROCESAMIENTO 30
3.2.3. INTERFAZ ENTRE EL PROCESAMIENTO Y EL BLOQUE DE COMUNICACIÓN 31
3.2.4. INTERFAZ HARDWARE–SOFTWARE 31

4. IMPLEMENTACIÓN EN PROTEUS 32

4.1. SENSORES DE MEDICIÓN DE DISTANCIA 32
4.1.1. SENSOR VL53L1X 32
4.1.2. SENSOR HC-SR04 35
4.1.2.1. SIMULACIÓN DE LA DISTANCIA EN PROTEUS 36
4.2. RASPBERRY PI PICO 36
4.3. COMUNICACIÓN DEL SISTEMA 37
4.3.1. COMUNICACIÓN VISUAL MEDIANTE LEDS 37
4.3.2. SEÑALIZACIÓN ACÚSTICA 38
4.3.3. VISUALIZACIÓN MEDIANTE DISPLAY LCD 39

5. FIRMWARE 41

5.1. ARQUITECTURA DEL FIRMWARE 41
5.2. ADQUISICIÓN DE DATOS 43
5.2.1. LECTURA DEL TOF 43
5.2.2. LECTURA ULTRASONIDOS 43
5.2.3. SELECCIÓN DISTANCIA FINAL 44

5.3. Filtrado, estabilización y temporización 44
5.3.1. Temporización del lazo de control 45
5.3.2. Filtrado en dos etapas: mediana (N=5) + EMA (α) 45
5.3.3. Efecto de filtrado y justificación 46
5.4. Umbrales, lógicas de decisión y alertas 48
5.4.1. Definición de umbrales y zonas de seguridad 48
5.4.2. Lógica de decisión 48
5.4.3. Alertas visuales mediante LEDs 48
5.4.4. Alertas acústicas mediante buzzer 49
5.4.5. Visualización en el display LCD 49

6. DISEÑO PCB 51

6.1. Adaptaciones necesarias en el paso al entorno físico 51
6.1.1. Inclusión de resistencias pull-up en el bus I²C 51
6.1.2. Inclusión de condensadores de desacoplo 51
6.2. Distribución de capas y ruteado 52
6.3. Implementación del plano de masa (Copper Pour) 53
6.4. Visualización 3D 55

7. DESARROLLO EN ALTIUM DESIGNER 57

7.1. Desarrollo de librerías y componentes 57
7.2. Desarrollo del esquemático 59
7.3. Desarrollo PCB 60
7.4. Visualización 3D 62
7.5. Comparativa Altium vs Proteus 64
7.6. Bills of Materials (BOM) 66

8. PLAN DE MARKETING 68

8.1. Propuesta de valor 68
8.2. Segmentación y cliente objetivo 68
8.2.1. Centros educativos y de formación 68
8.2.2. Pequeñas empresas e instalaciones industriales 69
8.3. Análisis de mercado y competencia 69
8.3.1. Benchmark 69
8.3.2. Oportunidad detectada 71
8.3.3. Análisis DAFO 71
8.4. G2M (Go-to-market) 72
8.4.1. Entrada en el sector educativo 72
8.4.2. Expansión hacia el sector industrial 72
8.4.3. Canales de comercialización 72
8.4.4. Acciones iniciales de lanzamiento 73
8.5. Modelo de ingresos 73
8.5.1. Venta del producto 73
8.5.2. Relación con el coste del producto 73
8.5.3. Evolución futura 73
8.6. Marketing Mix (4P) 74
8.6.1. Producto 74
8.6.2. Precio 74
8.6.3. Plaza 75
8.6.4. Promoción 75
8.7. Posicionamiento 75
8.8. Escalabilidad 76
8.8.1. Escalabilidad productiva 76
8.8.2. Escalabilidad comercial 76
8.8.3. Evolución futura del producto 76

9. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD 78

10. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 1. arquitectura del sistema 27
Fig. 2. Sistema completo en Proteus 32
Fig. 3. Modelo VSM 33
Fig. 4. Modelo sustituto del ToF 34
Fig. 5. Sensor HC-SR04 35
Fig. 6. Raspberry Pi Pico 37
Fig. 7. LEDs 38
Fig. 8. Buzzer 39
Fig. 9. Display LCD 40
Fig. 10. Diagrama de flujo del sistema 42
Fig. 11. Adaptación a modelo físico 52
Fig. 12. Ruteado inicial de la PCB 53
Fig. 13. Plano de cobre 54
Fig. 14. Vista superior PCB 56
Fig. 15. Vista inferior PCB 56
Fig. 16. Símbolo esquemático RP2040 58
Fig. 17. Footprint RP2040 58
Fig. 18. Modelo tridimensional RP2040 59
Fig. 19. Esquemático Altium 60
Fig. 20. Ruteado PCB Altium 61
Fig. 21. Copper pour Altium 62
Fig. 22. Vista superior PCB Altium 63
Fig. 23. Vista inferior PCB Altium 63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa en tecnologías de sensores de distancia 18
Tabla 2. Comparativa VL53L1X - HC-SR04 19
Tabla 3. Características de plataformas de desarrollo 22
Tabla 4. Interfaces funcionales entre bloques 30
Tabla 5. Evolución distancia α = 0,25 47
Tabla 6. Evolución distancia α = 0,3 47
Tabla 7. Resumen funcionamiento global 50
Tabla 8. Comparativa Proteus vs Altium 64
Tabla 9. Bills Of Materials 66
Tabla 10. Características empresas 71
Tabla 11. Análisis DAFO 71
Tabla 12. Diferenciación entre versiones 74

1. INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos y la mejora en la seguridad en entornos industriales y logísticos se han convertido en aspectos clave dentro del desarrollo tecnológico actual. En los almacenes, es fundamental disponer de sistemas capaces de detectar situaciones de riesgo y sistemas de aviso para evitar accidentes, optimizar flujos de trabajo y garantizar la integridad tanto de operarios como de equipos. Por ello, los sistemas de alerta basados en sensores resultan fundamentales ya que proporcionan información continua sobre el entorno y permiten detectar de manera temprana situaciones potencialmente peligrosas.

El avance de la electrónica ha facilitado el desarrollo de soluciones cada vez más complejas, pero a su vez más pequeñas y económicas. El uso de microcontroladores junto con diferentes tipos de sensores permite crear sistemas de detección adaptables a distintos escenarios. Algunos de los sensores más utilizados en este ámbito son aquellos que se basan en tecnologías de ultrasonidos y ToF (Time of Flight), que permiten realizar mediciones de distancia con diferentes rangos y niveles de precisión.

El sistema propuesto para este TFM (Trabajo Fin de Máster) se centra en el diseño y desarrollo de un sistema de alerta basado en sensores de distancia y diseñado para integrarse en maquinaria o equipos utilizados en entornos tanto educativos como industriales y logísticos. El sistema integra tecnologías de medición de distancia con el objetivo de cubrir distintos rangos, así como elementos de señalización visual y sonora que permitan informar al usuario del estado del entorno de manera clara e intuitiva. De esta manera el sistema facilita el tener una mejor percepción del entorno por parte de los trabajadores y aumentar el nivel de seguridad.

Estos sistemas pueden aplicarse en diferentes contextos industriales, especialmente en instalaciones logísticas y de almacenamiento donde se utilizan diversos tipos de maquinaria. Entre las posibles aplicaciones se encuentran las carretillas elevadoras, vehículos de transporte interno, equipos de manipulación de cargas o zonas de carga y descarga donde la interacción maquinaria-operario es alta.

A lo largo del trabajo se analizan las soluciones existentes, se justifica la elección de los componentes empleados y se describen las distintas etapas de desarrollo, desde un boceto del sistema hasta la implementación del diseño final. Asimismo, se centra en la validación del sistema mediante la simulación, lo que permite corroborar su correcto funcionamiento antes de la fabricación del hardware. De esta manera, el proyecto pretende servir como ejemplo práctico del proceso completo de diseño de un sistema electrónico embebido, combinando aspectos teóricos y prácticos, y sentando las bases para futuras mejores o ampliaciones del sistema.

1.1. Motivación

La motivación para la realización de este TFM surge, en primer lugar, de un interés personal en desarrollar un proyecto que estuviera vinculado con el ámbito de la electrónica y la automática ya que son las áreas en las que se enmarca mi formación de grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Durante el desarrollo de mi TFG (Trabajo de Fin de Grado), el proyecto se llevó a cabo en un entorno empresarial que no estaba directamente relacionado con los contenidos específicos con la titulación, lo que hizo que quedara pendiente la realización de un trabajo más cercano a ello. Es por ello que este TFM se concibe como una forma de cerrar ese ciclo formativo, permitiendo aplicar de manera integrada los conocimientos propios de esta rama de la ingeniería.

Además, la motivación del trabajo se ve fundamentada por la importancia actual de los sistemas de detección y alerta, especialmente en entornos industriales y logísticos, donde la seguridad y la automatización de tareas desempeñan un papel fundamental. El diseño de un sistema de control embebido permite abordar de forma conjunta aspectos clave de la ingeniería electrónica y automática, como el procesamiento de datos y la toma de decisiones en tiempo real. De este modo, el proyecto no solo responde a un interés personal, sino también a una necesidad técnica real, reforzando su utilidad como ejercicio práctico formativo dentro del ámbito de la ingeniería industrial.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este TFM es el diseño y desarrollo de un sistema de alerta basado en sensores de distancia, orientando a su aplicación en entornos educativos, industriales o logísticos, donde la rápida detección de obstáculos o las situaciones de riesgo resultan fundamentales para mejorar la seguridad y la eficiencia. El sistema propuesto pretende integrar diferentes tecnologías de sensores junto a una plataforma de control embebida, permitiendo la supervisión del entorno y la generación de avisos visuales en función de la distancia detectada.

Para poder alcanzar este objetivo general, el trabajo se estructura en una serie de objetivos más específicos que abarcan las diferentes fases de desarrollo del proyecto. Dentro de estas fases podemos destacar el estudio y selección de las tecnologías, el diseño del sistema electrónico, el desarrollo del entorno de simulación, la programación del sistema de control, el diseño de la PCB (Placa de Circuito Impreso) y el desarrollo del marketing asociado al sistema.

En primer lugar, se plantea el estudio y selección de las tecnologías más adecuadas, entre las que destacamos los sensores para la medición de distancias para distintos rangos, analizando sus principios de funcionamiento, ventajas y desventajas. Este análisis permite justificar la selección de los sensores empleados y definir el papel de cada uno en el sistema global.

También juega un papel importante la selección del microcontrolador a utilizar ya que condiciona directamente la capacidad de procesamiento, la gestión de los sensores y la comunicación con los elementos de señalización. Un microcontrolador adecuado permite garantizar la compatibilidad eléctrica y funcional entre los distintos bloques del sistema. Además, influye en la escalabilidad futura y en la posibilidad de implementar mejoras o ampliaciones del diseño.

La selección del software en el que se desarrolla el trabajo es fundamental para asegurar una implementación fiable y eficiente. Un entorno de software adecuado facilita la programación y validación del comportamiento del sistema tanto en simulación como en hardware real.

Otro objetivo fundamental es el diseño del sistema electrónico, incluyendo el esquema eléctrico y la integración de los diferentes componentes, tales como sensores, microcontrolador y elementos de señalización. En este punto, se presta especial atención a la compatibilidad eléctrica entre los distintos bloques, a la correcta alimentación del sistema y a la definición de las interfaces necesarias para la comunicación y el control de los dispositivos.

Asimismo, se establece el siguiente objetivo: el desarrollo del entorno de simulación con el fin de validar el funcionamiento del sistema antes de su implementación física. Dado

que no siempre se dispone de modelos de simulación completos para todos los componentes reales, el trabajo contempla la creación de soluciones equivalentes que permitan reproducir el comportamiento funcional de ellos y verificar la lógica de control del sistema en el entorno virtual.

Otro de los objetivos a destacar sería la programación del sistema de control, definiendo los algoritmos necesarios para la adquisición de datos de los sensores, el procesamiento de la información y la activación de las señales de alerta en función de los diferentes parámetros planteados.

También se plantea el diseño de la PCB del sistema, trasladando el esquema eléctrico validado a un diseño físico preparado para su fabricación. Este objetivo incluye la definición de las huellas de los componentes, la distribución de los elementos en la placa y el enrutado de las señales, siguiendo criterios básicos de diseño electrónico y buenas prácticas de ingeniería.

Por último, se establece como objetivo el desarrollo de un plan de marketing cuyo fin es el de analizar la viabilidad del sistema desde un punto de vista comercial. Este objetivo contempla la definición de una propuesta de producto, la identificación del público objetivo y del entorno de aplicación, así como el estudio de aspectos básicos relacionados con el precio, canales de distribución y estrategias de promoción. De este modo, se busca complementar el desarrollo técnico del sistema con una visión global que permita valorar su potencial de implantación en un contexto real de mercado.

1.3. Metodología

La metodología de este trabajo se puede estructurar en varias fases.

En una primera fase se realiza el análisis del problema y de las soluciones existentes, identificando las necesidades de los clientes en relación al tema del trabajo. A partir de este análisis se definen los requisitos del sistema.

Posteriormente, se lleva a cabo el diseño conceptual del sistema, estableciendo la arquitectura general y la división de bloques funcionales: medición de distancia, procesamiento y control, comunicación del estado y alimentación. En esta etapa se seleccionan los principales componentes, como son las Raspeberry Pi Pico o los sensores ultrasónicos y ToF.

En la siguiente fase se desarrolla el diseño detallado del sistema, que incluye el esquemático, la definición de interfaces entre bloques y la lógica de control. Además, se realizará paralelamente la programación del firmware, encarga de la adquisición de datos, el procesamiento de la información la generación de los avisos al usuario.

Después, se pasará a la simulación del sistema mediante Proteus, lo que permitirá validar el comportamiento del sistema antes de su implementación física. Posteriormente, se realizará la placa de circuito impreso con Altium Designer, incluyendo ruteado y visualización 3D.

Finalmente, se realizará un plan de marketing con el que tendremos un estudio de viabilidad en el que se analizan aspectos estratégicos relacionados con sus posibles aplicaciones y su evolución hacia un producto real.

2. ESTADO DEL ARTE

En los entornos logísticos y de almacenamiento, los sistemas de alerta y seguridad han adquirido un papel fundamental en cuanto a la prevención de accidentes y a la optimización de las operaciones. Estos sistemas incluyen desde alarmas luminosas y sonoras hasta barreras fotoeléctricas, detectores de proximidad o soluciones más avanzadas basadas en IoT. Su principal función es la de advertir a operarios y maquinaria de situaciones potencialmente peligrosas, garantizando un flujo de trabajo seguro y eficiente.

En este contexto, la integración de sensores y microcontroladores se ha convertido en un aspecto clave a la hora de desarrollar sistemas de alerta inteligentes. Sensores como los ultrasónicos o los ToF ofrecen mediciones precisas que permiten detectar objetos y distancias, mientras que los microcontroladores procesan esa información en tiempo real y ejecutan las acciones necesarias. Estas tecnologías han facilitado el desarrollo de soluciones de menor tamaño y coste. Además, su integración en diferentes entornos industriales resulta relativamente sencilla, lo que ha favorecido su implantación en sistemas de alerta y supervisión. Con esta base, en este capítulo se analizarán los principales conceptos y antecedentes tecnológicos que sustentan los actuales sistemas de prevención y alerta inteligente.

2.1. Introducción al ámbito industrial

[1] Los almacenes industriales pueden definirse como naves o instalaciones en las que se desarrollan diferentes procesos relacionados con la gestión de productos, que pueden abarcar desde la recepción de materias primas hasta el almacenamiento de productos terminados. Así, los almacenes industriales pueden llegar a desarrollar una cadena productiva completa en su interior. Aunque están dedicados también al almacenaje de productos y materiales, es importante no confundirlos con los centros logísticos.

Se pueden encontrar muchos tipos de almacenes industriales, pero, en general, todos albergan zonas de producción y fabricación, zonas de almacenaje y zonas de carga y descarga. Además, hoy en día, aunque siguen existiendo almacenes convencionales, cada vez es más habitual encontrar instalaciones parcial o totalmente automatizadas y en su interior se encuentran conviviendo maquinaria, mercancía y operarios.

[2] El desarrollo de sistemas automatizados en entornos industriales ha generado nuevos retos en relación con la seguridad. En particular, la interacción entre máquinas, sistemas electrónicos y personal técnico obliga a establecer medidas que garanticen la seguridad. Esta seguridad industrial se fundamenta en tres pilares: la protección del personal, orientada a prevenir accidentes y lesiones en los trabajadores, la protección de los equipos en la que se garantice su buen funcionamiento y se minimicen los daños en caso de fallos, y el cumplimiento normativo para evitar sanciones y asegurar un ambiente de trabajo seguro. Se pueden destacar como normas y regulaciones la ISO 13849-1:2016 [3]: seguridad de las máquinas y la IEC 61508:2011 [4]: seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/programables relacionados con la seguridad.

Estas normas parten del análisis de peligros y evaluación del riesgo como punto de partida y exigen que las funciones de seguridad estén diseñadas de forma verificable y documentada. La IEC 61508 proporciona un enfoque genérico de seguridad funcional aplicable a sistemas electrónicos y programables a lo largo de todo su ciclo de vida. La ISO 13849-1 concreta estos principios en el ámbito de la seguridad de máquinas,

introduciendo conceptos como el nivel de prestaciones para asegurar que las partes del sistema de mando relacionadas con la seguridad cumplen el nivel de fiabilidad requerido.

Ambas normas se alinean con el proyecto al plantear un sistema de detección y alerta que actúa como función de seguridad, donde no solo importa la tecnología empleada, sino la fiabilidad global, la respuesta ante fallos y la correcta integración del sistema dentro de una estrategia de reducción de riesgos.

El sistema desarrollado en este proyecto se concibe como un sistema de aviso o ayuda a la operación, ya que su misión es la de informar al operador de una situación potencialmente peligrosa, pero no actúa directamente sobre la máquina. Aun así, la normativa condiciona el diseño y sirve como guía técnica. Obliga a partir de un análisis de riesgos, a definir claramente el papel del sistema dentro de la estrategia global de seguridad y a considerar el comportamiento ante fallos, priorizando respuestas seguras y evitando avisos erróneos.

2.2. Evolución histórica de los almacenes

[5] Aunque los almacenes se suelen considerar una creación moderna, su origen se remonta a miles de años atrás. Uno de los primeros ejemplos documentados es el Horrea Galbae de la antigua Roma, un complejo de más de 140 salas cerca del río Tíber y construido para almacenar y distribuir principalmente grano, pero también otros productos como vino y aceite. Su ubicación estratégica junto al puerto facilitaba la recepción de mercancías y establecía nuevas rutas comerciales.

Sin embargo, el término almacén no apareció hasta el siglo XIII en Gran Bretaña, donde se definió como un espacio dedicado al almacenamiento de bienes y que, con la expansión marítima británica, se multiplicaron en los puertos europeos.

Durante la primera Revolución Industrial, el concepto de almacén evolucionó hacia la idea de “almacenamiento”. La producción en masa y el uso de máquinas de vapor exigieron nuevos espacios para guardar grandes volúmenes de mercancías. Más tarde, con el desarrollo del ferrocarril, se impulsó el nacimiento de la logística, permitiendo que los almacenes actuaran como centros de distribución para abastecer regiones cada vez más amplias.

La segunda Revolución Industrial trajo consigo la electricidad, teléfonos y motores de combustión, transformando tanto la fabricación como el almacenamiento. La expansión del comercio y la aparición de la empresa Sears, que construyó un gran negocio de pedidos por correo, consolidaron enormes centros de distribución, evidenciando la necesidad de procesos de inventario más organizados.

Durante el siglo XX, los almacenes incorporaron nuevas herramientas como carretillas elevadoras, palets y sistemas de almacenamiento más eficientes. Más tarde, la llegada del código de barras y los primeros sistemas de gestión de almacenes marcaron el inicio de la digitalización del sector.

[6] En la actualidad, los almacenes continúan evolucionando mediante tecnologías como RFID (Radio Frequency IDentification), robótica, dispositivos móviles, IA (Inteligencia Artificial), IoT (Internet of Things) y análisis de datos, orientadas a la mejora de la eficiencia y la precisión en la gestión. Los almacenes modernos se han convertido en centros logísticos, altamente digitalizados, impulsados por software, IoT e IA, que optimizan el espacio verticalmente, agilizan el picking con sistemas automáticos y ofrecen valor

añadido más allá del simple guardado, enfocándose en la velocidad y precisión a la hora de satisfacer la demanda en base a los requisitos de los clientes.

[7] La evolución de los almacenes ha tenido un impacto directo en los requisitos de seguridad y control operativo. La convivencia entre operarios y maquinaria, junto con el aumento de la velocidad de los procesos y la reducción de los márgenes de maniobra, incrementan el riesgo de colisiones y situaciones potencialmente peligrosas. En este contexto, la incorporación de sistemas capaces de detectar la proximidad de obstáculos y generar alertas en tiempo real se convierten en un elemento clave para la prevención de accidentes.

De la evolución histórica de los almacenes se desprende que el paso de espacios de almacenamiento estáticos a entornos logísticos altamente dinámicos ha transformado no solo los procesos operativos, sino también los riesgos asociados a la actividad diaria. El incremento de la cantidad de mercancías, la incorporación de maquinaria y la convivencia de esta con las personas han generado la necesidad de crear soluciones técnicas orientadas a la seguridad y prevención de accidentes.

2.3. Riesgos laborales en almacenes

[8] Los almacenes son fundamentales dentro de la cadena de suministro, pero presentan diversos riesgos laborales que pueden afectar tanto a la seguridad del personal como a la integridad de las mercancías. Para garantizar un entorno de trabajo seguro, es esencial identificar estos riesgos y aplicar medidas preventivas adecuadas [9]:

- Desorden y falta de limpieza: Mala organización, almacenamiento incorrecto o espacios insuficientes para la circulación.
- Caídas de los trabajadores: Se pueden producir tanto al mismo nivel, por tropiezos, resbalones u obstáculos, como a distinto nivel, sobre todo al usar escaleras, elevadores, carretillas o durante operaciones de carga y descarga.
- Caída de objetos: Se deben a una mala colocación de la mercancía, apilamientos incorrectos, fallos en la sujeción o accidentes durante su manipulación.
- Choques y atropellos: Incluyen colisiones con maquinaria móvil como carretillas o transpaletas, impactos contra elementos fijos en zonas de paso o atropellos provocados por vehículos industriales.
- Riesgos específicos por tarea: Incluyen cortes, golpes o contacto con sustancias nocivas, en función de la actividad desarrollada en el almacén.
- Riesgo de incendio: Relacionado con la presencia de maquinaria, acumulación de material y posible almacenamiento de productos inflamables.
- Falta o uso incorrecto de EPIs: No utilizar los equipos de protección individual necesarios como cascos, protección auditiva o calzado de seguridad, incrementa la probabilidad de sufrir accidentes.

2.4. Maquinaria presente en almacenes y su convivencia

[10] Las máquinas son esenciales en cualquier instalación logística ya que permiten el movimiento interno de mercancías. Estas pueden clasificarse, de forma general, en máquinas manuales y automáticas. Además, también tienen otro tipo de clasificación según la operativa o el proceso logístico que realizan, facilitando así su organización y adecuación a las necesidades del almacén.

La presencia de estas máquinas implica una convivencia constante entre trabajadores y equipos, lo que convierte la seguridad en un aspecto fundamental. La interacción en espacios compartidos, el movimiento continuo de vehículos y la automatización parcial o total de determinados procesos incrementan la complejidad de la operación logística. Por este motivo, resulta necesario adoptar medidas organizativas y técnicas que garanticen un entorno de trabajo seguro. Entre las medidas más habituales se encuentran la señalización adecuada de las zonas de trabajo, la delimitación de áreas de tránsito para operarios y vehículos, la formación específica en el manejo de maquinaria y la supervisión de los sistemas automatizados presentes en la instalación.

2.5. Sistemas de alerta en almacenes

La prevención de riesgos en un almacén puede reforzarse mediante la incorporación de distintos sistemas y tecnologías orientados a mejorar la seguridad y facilitar las operaciones diarias. Entre los sistemas automáticos más habituales destacan los pulsadores de parada de emergencia, que permiten detener la maquinaria de forma inmediata ante cualquier situación de peligro, los sensores de detección de obstáculos o movimiento, instalados en equipos como transelevadores o estanterías móviles para evitar colisiones, y las instalaciones que favorecen el orden y la limpieza, como electrovías que despejan el suelo y reducen el riesgo de caídas.

Además, el uso de software de gestión logística, capaz de optimizar la distribución de mercancías y reducir movimientos repetitivos, contribuye a minimizar lesiones musculoesqueléticas y a mejorar la eficiencia operativa. También desempeñan un papel importante el uso de estanterías adecuadas, cuyo diseño debe adaptarse al tipo de carga, al entorno y a posibles exigencias estructurales.

Por último, la seguridad contra incendios requiere la integración de sistemas de detección, extinción y prevención, como sensores de humo, rociadores automáticos, extintores o puertas ignífugas.

2.6. Tecnologías actuales de detección de distancia

[11] Los sensores de proximidad y distancia permiten detectar objetos y determinar su ubicación sin contacto físico, lo que los convierte en elementos esenciales en numerosos procesos industriales. Su uso es común en dispositivos electrónicos, sistemas de seguridad y, especialmente, en aplicaciones de automatización industrial. Al no requerir de contacto físico, estos sensores son fiables, duraderos, de bajo mantenimiento y adecuados para entornos hostiles.

En el ámbito de la automatización y la instrumentación industrial existe una amplia variedad de sensores, cada uno diseñado para medir magnitudes físicas diferentes y adaptarse a necesidades específicas. Entre los más utilizados se encuentran los sensores

de proximidad, temperatura, presión, luz o movimiento, así como los basados en tecnologías inductivas, capacitivas, ópticas u ultrasónicas.

No obstante, para el desarrollo de este proyecto resulta relevante el estudio de los sensores de distancia más comunes como son los sensores de ultrasonidos, los basados en tecnología ToF (Time of Flight), los IR (Infrarrojos), los LiDAR (Light Detection And Ranging) y sensores láser de distancia [12]: En la siguiente tabla (Tabla 1. Comparativa en tecnologías de sensores de distancia) se muestran algunas de las características más significativas que definen a estos sensores:

Característica / Sensor	**Rango**	**Precisión**	**Coste**	**Ventajas**	**Limitaciones**
Ultrasonidos	Medio	Medio	Bajo	Accesible Independiente de la iluminación	Sensible al viento y a las superficies absorbentes
ToF	Corto-medio	Alta	Medio	Preciso y buena linealidad	Sensible a luz ambiente y a superficies oscuras
IR	Corto	Bajo-Medio	Muy bajo	Bajo consumo y respuesta rápida	Sensibilidad a luz ambiente y alcance limitado
LiDAR	Largo	Muy alta	Medio	Alta precisión y capacidad de mapeo 3D	Dificultad con superficies transparentes
Láser	Medio-Largo	Alta	Alto	Muy preciso en la medición	Sensible a la reflectividad de la superficie

TABLA 1. COMPARATIVA EN TECNOLOGÍAS DE SENSORES DE DISTANCIA

En este proyecto se van a utilizar tanto un sensor ToF para medir distancias cortas (0-120 cm) como un sensor ultrasonidos para distancias mayores (120 – 200 cm). En concreto, el sensor ToF elegido es el VL53L1X y el ultrasonidos seleccionado es el HC-SR04. A continuación, se muestran las principales características en la Tabla 2. Comparativa VL53L1X - HC-SR04. La información ha sido recogida en las datasheets de ambos sensores proporcionadas por los fabricantes [13] [14] respectivamente.

Sensor / Característica	**VL53L1X**	**HC-SR04**
Principio de medida	Emisor láser IR de 940 nm y detección mediante matriz receptora SPAD	Calcula la distancia midiendo el tiempo entre la emisión y la recepción del eco

Rango	Hasta 400 cm	De 2 a 450 cm
Precisión	± 20 mm	± 3 mm
Frecuencia de medición	Hasta 50 Hz	20-40 Hz
Campo de visión (FoV)	15º, 20º, 27º	15º
ROI	4x4, 8x8, 16x16	No disponible
Limitaciones	Luz ambiente, reflectancia, ángulo de incidencia, interferencias	Superficies absorbentes, corrientes de aire, inclinación del objeto
Observaciones	Alta precisión y posibilidad de ajuste del área de detección	Sensor sencillo y económico con mayor alcance pero menor control sobre la medición

TABLA 2. COMPARATIVA VL53L1X - HC-SR04

2.7. Microcontroladores en sistemas embebidos

[15] Un microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de ejecutar instrucciones específicas para controlar dispositivos electrónicos o procesos físicos. Su funcionamiento es similar al de un ordenador, aunque orientado a tareas más específicas y con menor tamaño y coste. [16] Su versatilidad y bajo coste lo convierten en un componente esencial en numerosos ámbitos, especialmente en la industria, donde se utiliza para automatizar y gestionar operaciones.

[17] Uno de los primeros microcontroladores comerciales fue desarrollado por Texas Instruments en la década de 1970, casi a la par que el primer microprocesador desarrollado por Intel. Estos microcontroladores integraban procesador, memoria y reloj en un solo chip, marcando el inicio de los sistemas embebidos modernos. Intel desarrolló en 1977 el 8048, un microcontrolador de gran éxito que sería utilizado en millones de dispositivos como teclados de PC, consolidándose como una de las tecnologías más influyentes de la compañía.

Durante los años siguientes surgieron múltiples variantes de microcontroladores basadas en diferentes tecnologías de memoria como EPROM, PROM u OTP, cada una con distintas características y costes. La llegada de EEPROM en 1993, con modelos como el PIC16C84, permitió programar y borrar los dispositivos de forma rápida y sin hardware costoso,

facilitando el prototipado. Ese mismo año, Atmel presentó el primer microcontrolador con memoria Flash, revolucionando aún más el desarrollo embebido.

Como resultado de esta evolución tecnológica, actualmente existe una gran variedad de microcontroladores con diferentes capacidades de procesamiento, consumo energético y periféricos integrados. Esta diversidad permite seleccionar el dispositivo más adecuado para cada aplicación, desde proyectos simples de bajo coste hasta sistemas industriales complejos.

En muchos proyectos, los microcontroladores se utilizan dentro de las placas de desarrollo que integran el propio chip junto con otros elementos necesarios para su programación, alimentación y conexión con otros dispositivos. Estas plataformas facilitan el diseño y la validación de sistemas electrónicos antes de su implementación final.

2.8. Principales placas de desarrollo

En el diseño de un sistema que utiliza microcontroladores es esencial comprender tanto el hardware como el software que se empleará, ya que existen numerosas placas de desarrollo con características únicas. En esta sección se presentarán distintas opciones de placas de microcontroladores según su fabricante, destacando sus ventajas, desventajas y aplicaciones típicas [18].

1. **Arduino** [19]**:** es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software libre, diseñada para ser flexible y fácil de usar. Permite desarrollar sistemas electrónicos programables mediante placas de desarrollo basadas en microordenadores.
    a. **Ventajas:** es de código abierto y tiene una amplia documentación disponible con una gran comunidad de soporte. Es económico y cuenta con una gran variedad de placas.
    b. **Desventajas:** menor capacidad de procesamiento y memoria respecto a otros microcontroladores, menor precisión y velocidad por lo que no está diseñado para entornos industriales exigentes.
    c. **Aplicaciones:** prototipos electrónicos, domótica y pequeñas automatizaciones domésticas, proyectos IoT con comunicación Wi-Fi o Bluetooth
2. **Raspberry Pi PICO** [20]**:** placa desarrollada por la fundación Raspberry Pi que incorpora el procesador RP2040. La PICO es un producto diferente al que acostumbra Raspberry Pi ya que cuenta con un procesador ARM Cortex-M0+ dual-core.
    a. **Ventajas:** bajo coste y bajo consumo energético. Cuenta con una gran flexibilidad de programación con lenguajes como C++ y MicroPython.
    b. **Desventajas:** su principal limitación es que no cuenta con conectividad Wi-Fi o Bluetooth (solo el modelo W) y tiene una memoria limitada.
    c. **Aplicaciones:** proyectos embebidos y de tiempo real, prototipos de bajo consumo y automatizaciones simples

3. **ESP32** [21]**:** creado y desarrollado por la empresa Espressif Systems, es el sucesor de la familia ESP8266. ESP32 es una familia de microcontroladores tipo SoC (System on a Chip) de bajo coste, tecnología Wi-Fi y Bluetooth.
    a. **Ventajas:** integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, con precio asequible y gran cantidad de periféricos y GPIOs.
    b. **Desventajas:** Algo más complejo de configurar y programar, mayor consumo de energía que otros microcontroladores.
    c. **Aplicaciones:** gracias a su gran capacidad de comunicación inalámbrica es ideal para proyectos de IoT como domótica o control remoto.
4. **STM32** [22]**:** desarrollado y fabricado por STMicroelectronics, pertenece a la familia de microcontroladores de 32 bits, basada en procesadores ARM Cortex-M de arquitectura ARM.
    a. **Ventajas:** amplia familia de microcontroladores con opciones desde gama baja hasta alto rendimiento con una gran cantidad de documentación ofrecida por el fabricante.
    b. **Desventajas:** requiere conocimientos más avanzados tanto de electrónica como de programación ya que puede llegar a ser muy compleja
    c. **Aplicaciones:** altamente utilizado en entorno industrial y sistemas de alto rendimiento.
5. **PIC** [23]**:** familia de microcontroladores desarrollada por Microchip Technology que se utiliza en sistemas integrados por su bajo consumo de energía, bajo coste y alta versatilidad.
    a. **Ventajas:** cuenta con una amplia variedad de familias adaptables a múltiples niveles de complejidad, son muy estables y fiables.
    b. **Desventajas:** ecosistema de comunidad más pequeño comparado con otros microcontroladores y una programación y configuración que pueden llegar a ser muy complejas.
    c. **Aplicaciones:** son utilizados en proyectos de automatización industrial, electrónica de consumo, pequeños proyectos de bricolaje y sistemas automotrices.

A continuación, en la tabla inferior (Tabla 3. Características de plataformas de desarrollo) se muestra un resumen de las diferentes placas de desarrollo de microcontroladores y sus características más significativas:

Característica / Placa de desarrollo	**Arduino Uno**	**Raspberry Pi Pico**	**ESP32**	**STM32**	**PIC**
Tensión de alimentación	5V	3,3 V	3,3 v	3,3 V	3,3 V
GPIO disponibles	20	26	~34	Depende del modelo	Depende del modelo
Memoria Flash	32 kB	2 MB	4-16 MB	128 kB - varios MB	32 kB - varios MB
Conectividad integrada	No	No	Wi-Fi y Bluetooth	Normalmente sin conectividad integrada	Normalmente sin conectividad integrada
Frecuencia máxima CPU	16 MHz	133 MHz	Hasta 240 MHz	Hasta ~480 MHz según modelo	Hasta ~200 MHz según modelo
Consumo energético	Bajo	Bajo	Medio	Bajo-Medio	Bajo

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE PLATAFORMAS DE DESARROLLO

2.9. Herramientas de diseño electrónico asistido por ordenador (EDA)

[24] El diseño electrónico asistido por ordenador (EDA, por sus siglas en inglés) ha supuesto un cambio fundamental en la concepción y desarrollo de circuitos y sistemas electrónicos. Antes de la introducción de estas herramientas, el diseño se realizaba de manera manual, lo que implicaba procesos lentos, una elevada probabilidad de error y largos tiempos de desarrollo. Los esquemas se elaboraban sobre papel vegetal, mediante técnicas de dibujo manual con reglas, rotuladores y, en fases más avanzadas, plantillas específicas para componentes electrónicos.

[25] El EDA engloba un conjunto de herramientas de software y, en algunos casos, hardware, destinadas al diseño, simulación, verificación, fabricación y pruebas de sistemas electrónicos. Estas herramientas permiten generar representaciones virtuales de los circuitos, analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de

funcionamiento, verificar su operatividad y producir los archivos necesarios para la fabricación de PCB, así como para la realización de pruebas automatizadas.

[26] Los beneficios del EDA son numerosos y significativos, de los cuales podemos destacar el aumento de la productividad, la reducción de errores, la mejora de la calidad del diseño, la reducción del tiempo de comercialización y la reducción de costes. Las herramientas EDA, además, abarcan numerosas funcionalidades como son:

- **Herramientas de diseño esquemático**: permiten a los ingenieros elaborar diagramas de circuitos electrónicos de manera gráfica, utilizando simbología normalizada para representar componentes y sus interconexiones. Estas herramientas suelen incorporar amplias bibliotecas, así como funciones de comprobación automática que facilitan la detección de errores en el diseño.
- **Simuladores de circuitos electrónicos**: habitualmente integrados en las propias herramientas de diseño esquemático, posibilitan la simulación del comportamiento de un circuito en un entorno virtual, previo a su fabricación.
- **Herramientas de diseño de PCB**: permiten definir el diseño físico de la placa de circuito impreso, incluyendo la colocación de componentes, el enrutamiento de las pistas y la generación de los archivos necesarios para su fabricación, incorporando además funciones de verificación y optimización del diseño.
- **Herramientas de simulación 3D**: habitualmente integradas en las herramientas de diseño de PCB, permiten visualizar el diseño electrónico en un entorno tridimensional antes de su fabricación. Estas visualizaciones facilitan la detección de errores mecánicos o de ensamblaje y resultan especialmente útiles para la representación del diseño a perfiles no técnicos.
- **Herramientas de síntesis y optimización**: automatizan la conversión de diseños de alto nivel en implementaciones a nivel lógico, permitiendo optimizar parámetros como el tamaño, la velocidad o el consumo energético. Son habituales en el desarrollo de circuitos programables como FPGA (circuitos de lógica programables)
- **Herramientas de análisis**: incluyen funciones de análisis específicas para placas de circuito impreso, como estudios térmicos o de compatibilidad electromagnética, orientados a validar el comportamiento del diseño en condiciones reales de operación.
- **Herramientas de fabricación y prueba**: generan los archivos necesarios para la fabricación de PCB y permiten la realización de pruebas automatizadas sobre circuitos y sistemas electrónicos.

- **Herramientas de gestión de documentación**: facilitan la generación y mantenimiento de documentación asociada al diseño, como la lista de materiales (Bills Of Materials (BOM)), información de componentes, costes y otros datos relevantes del proyecto.

2.9.1. Proteus

[27] En este proyecto se va a utilizar el software Proteus ya que es una opción equilibrada y con funciones de programar microcontroladores. Proteus se presenta como una suite integral para la captura de esquemáticos, la simulación de circuitos electrónicos y el diseño de PCB. Su principal fortaleza reside en la capacidad de simulación y depuración de microcontroladores en tiempo real, lo que lo convierte en una herramienta especialmente valorada en el desarrollo de sistemas embebidos.

Entre sus principales ventajas destacan la simulación avanzada y realista de microcontroladores, una amplia biblioteca de componentes, una interfaz intuitiva y la integración directa entre simulación, diseño del esquemático y diseño de PCB. Como principal limitación, no tiene un modelo tan potente en el diseño de PCB como otras suites especializadas.

Debido a estas limitaciones, y con el objetivo de obtener un diseño de PCB más preciso y optimizado, se ha optado por utilizar Altium Designer para el desarrollo de la placa del sistema. Esta herramienta, ampliamente utilizada en entornos industriales, ofrece funcionalidades más avanzadas para la gestión de componentes, el enrutamiento de pistas y la verificación del diseño antes de su fabricación.

2.9.2. Altium Designer

[28] Altium Designer es una herramienta integrada de uso algo más complejo que Proteus pero que incorpora todas las funcionalidades necesarias para el diseño electrónico, desde la creación de componentes y sus footprints y la realización de esquemáticos, hasta el diseño de PCB y su análisis, permitiendo cumplir con los requisitos de diseño y los plazos establecidos de manera eficiente. Actualmente se considera una de las herramientas más avanzadas en el ámbito del diseño de PCB.

[29] Dentro de sus principales ventajas destaca su entorno unificado, que facilita la gestión de todo el flujo de diseño, así como su potente motor de enrutamiento y las herramientas de gestión de restricciones, que permiten optimizar el diseño eléctrico y físico de la placa. Además, incorpora una amplia biblioteca de componentes y funcionalidades de simulación y análisis que permiten validar el comportamiento del circuito antes de su fabricación.

Como limitaciones, presenta una curva de aprendizaje relativamente elevada y un coste de licencia considerable, ya que se trata de una herramienta comercial orientada principalmente a entornos profesionales, con precios que pueden superar los 7000 € anuales. Por este motivo, Altium Designer es ampliamente utilizado en sectores industriales como el aeroespacial, la defensa, la automoción y la electrónica de consumo.

2.9.3. Otros softwares de diseño

Entre las herramientas de diseño electrónico disponibles también pueden destacarse las siguientes:

- **EasyEda** [30]: herramienta de diseño electrónico en línea orientada a esquemáticos, PCB y simulación, especialmente adecuada para principiantes y proyectos de pequeña escala.
- **NI Multisim** [31]: software de simulación de circuitos electrónicos, ampliamente utilizado en entornos educativos y de investigación, enfocado al análisis de circuitos analógicos, digitales y de potencia.
- **DipTrace** [32]: suite de diseño electrónico de coste moderado que integra esquemáticos, diseño de PCB y gestión de bibliotecas, resultando adecuada para pequeñas y medianas empresas.
- **CircuitMaker** [33]: es una herramienta gratuita de diseño de PCB que destaca por sus capacidades de colaboración en línea y su amplia biblioteca de componentes, siendo apropiada para proyectos colaborativos y de código abierto.
- **DesignSparkPCB** [34]: software gratuito de diseño de PCB desarrollado por RS Components, caracterizado por una interfaz intuitiva y orientado al desarrollo de proyectos electrónicos generales.

2.10. Perspectiva de mercado

[35] El marketing puede entenderse como el conjunto de actividades mediante las cuales una empresa identifica, anticipa y satisface las necesidades de mercado, a través del desarrollo, la comunicación y la distribución de productos o servicios. De acuerdo con Philip Kotler, uno de los principales referentes en el estudio del marketing, este se concibe como un proceso de carácter social y administrativo mediante el cual individuos y organizaciones crean, ofrecen e intercambian valor con el fin de satisfacer deseos y necesidades.

Dentro de las metodologías clásicas, destaca la del **Marketing Mix** [36] basado en la gestión coordinada de cuatro variables fundamentales, las famosas 4P: producto, precio, plaza y promoción:

- El **producto** de la empresa debe ser mejor que el de la competencia, y no únicamente poseer los beneficios que el comprador busca.
- La estrategia de **precios** debe considerar la fijación del valor a lo largo de todo el canal de distribución, incorporando los costes asociados, el margen de beneficio y la participación económica de los distintos intermediarios.
- En cuanto a **plaza**, los canales de marketing constituyen sistemas orientados a reducir las distancias existentes entre la fase de fabricación y el uso final de los productos. Podemos diferenciar los tipos de intermediarios en cuanto a si poseen o no los bienes que comercializan.

- En cuanto a **promoción**, las empresas tienen que gestionar las relaciones con sus clientes de manera estructurada y controlada dado el creciente volumen de información y la necesidad de disponer de un conocimiento claro y fiable sobre las acciones llevadas a cabo. Resulta imprescindible el uso de herramientas de gestión conocidas como CRM (Customer Relationship Management)

Junto a este enfoque tradicional, en el desarrollo de nuevos productos también resulta esencial la **segmentación del mercado** [37], entendida como el proceso de dividir el mercado en grupos homogéneos de clientes con necesidades o comportamientos similares. La segmentación permite adaptar la propuesta comercial y priorizar aquellos nichos donde el producto presenta mayor potencial.

Asimismo, en mercados tecnológicos especializados cobra especial importancia el modelo **B2B (Business to Business)** [38], en el que las transacciones se producen entre empresas u organizaciones. En estos casos, la decisión de compra suele estar más vinculada a criterios funcionales, retornos de inversión, fiabilidad o soporte técnico.

2.11. Herramientas de análisis estratégico y de mercado

Para evaluar la viabilidad y el posicionamiento de nuevos productos existen diversas herramientas de análisis estratégico ampliamente utilizadas en el ámbito empresarial.

Una de las más conocidas es el **benchmarking** [39], que es el término utilizado para referirse a estudios comparativos de rendimiento, cuyo objetivo es evaluar qué iniciativas, empresas, políticas o sistemas presentan un comportamiento más adecuado para un fin determinado.

El bechmarking se define como la actividad asociada a la realización de dichos estudios, aunque tiene un alcance más amplio, ya que no se limita únicamente a la comparación de resultados, sino que persigue analizar e identificar los principios y prácticas que explican el mejor desempeño de algunos de los elementos evaluados frente a otros.

Otra herramienta habitual es el análisis **DAFO** (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) [40], que permite estudiar tanto factores internos de la organización como elementos externos del entorno competitivo. Gracias a este enfoque es posible detectar ventajas diferenciales, limitaciones, riesgos en el mercado y oportunidades.

También destaca la estrategia **G2M** (Go to market) [41], entendida como el conjunto de acciones destinadas a introducir un producto en el mercado de forma estructurada. Incluye decisiones relacionadas con el cliente objetivo, canales de comercialización, fases de lanzamiento o captación de primeros usuarios.

Para un proyecto tecnológico como el que se va a desarrollar, la combinación de estas herramientas permite complementar el análisis técnico con una visión orientada al mercado, facilitando la transición desde el prototipo funcional hacia una propuesta con potencial comercial.

3. DISEÑO DEL SISTEMA

El propósito de este trabajo es el diseño de un sistema basado en la detección de proximidad, orientado a informar al operador de la presencia y distancia de obstáculos en el entorno mediante avisos visuales y acústicos. El sistema pretende mejorar la percepción espacial del operador durante las maniobras o desplazamientos, reduciendo la probabilidad de situaciones de riesgo.

Desde el punto de vista funcional, el sistema cubre un rango de distancias comprendido entre 0 y 200 cm, estructurando dicha información en zonas diferenciadas de proximidad. Cada zona se asocia a un nivel de aviso específico, permitiendo al operador identificar de forma inmediata la cercanía del obstáculo.

3.1. Arquitectura general del sistema

El sistema se ha diseñado siguiendo una estructura centralizada, en la que un microcontrolador coordina la adquisición de información, su procesamiento y la generación de avisos. Esta arquitectura permite una implementación sencilla y una clara separación de responsabilidades entre los distintos elementos del sistema.

A nivel funcional, el sistema puede describirse como una cadena de procesamiento compuesta por tres etapas principales: la medición de la distancia, el procesamiento y la toma de decisiones y, finalmente, la comunicación del estado. Además, se incluye como bloque importante la alimentación del sistema. Esta organización facilita tanto la simulación del sistema como su posterior implementación hardware y software. En la imagen inferior (Fig. 1. arquitectura del sistema) se puede observar el esquema general del sistema.

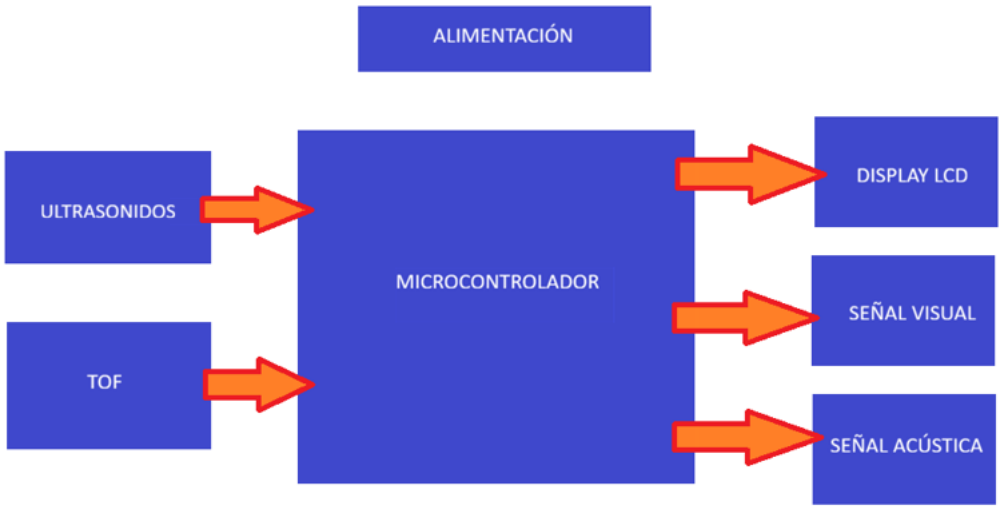


FIG. 1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

3.1.1. Bloque medición de distancia

El bloque de medición de distancia es el encargado de proporcionar al sistema información sobre la proximidad de los obstáculos presentes en el entorno. Para cubrir de manera más eficaz el rango de trabajo del sistema y mejorar la fiabilidad de la medida,

se ha optado por una estrategia basada en dos sensores de naturaleza complementaria, cada uno optimizado para un intervalo de distancias distinto.

Para distancias cortas, entre 0 y 120 cm, se emplea un sensor de tiempo de vuelo (ToF) VL53L1X, caracterizado por una buena resolución y estabilidad en distancias cortas, lo que permite detectar con precisión obstáculos cercanos al sistema. Como complemento, para distancias mayores, entre 120 y 200 cm, se incorpora un sensor ultrasónico HC-SR04, cuya tecnología permite ampliar el rango de detección de forma sencilla y robusta. Este sensor resulta adecuado para cubrir zonas más alejadas del sistema.

La elección de las distintas zonas de proximidad se ha realizado siguiendo criterios de reducción progresiva, en línea con los principios de diseño de sistemas relacionados con la seguridad descritos en normas como la UNE-EN ISO 13849-1 [3] y la UNE-EN 61508 [4]. Estas establecen que los sistemas de control tienen que ser capaces de detectar condiciones potencialmente peligrosas y proporcionar la información necesaria al usuario para poder adoptar las medidas correctivas antes de que se produzca un fallo.

La elección de esta combinación de sensores responde a criterios de cobertura completa del rango de trabajo, robustez frente a las limitaciones individuales de cada tecnología y continuidad de la información de proximidad, manteniendo al mismo tiempo una arquitectura clara y modular.

Desde el punto de vista de la arquitectura del sistema, ambos sensores se integran dentro de un único bloque funcional de medición de distancia. La salida de este bloque se define como el valor de la distancia al obstáculo, que es entregada a la unidad de procesamiento sin que esta dependa directamente del sensor que haya realizado la medición.

3.1.2. Bloque de procesamiento

El bloque de procesamiento y control constituye el núcleo del sistema y es el responsable de coordinar el funcionamiento global del mismo. Este bloque se implementa mediante un microcontrolador, que actúa como unidad central, y se encarga de adquirir la información procedente del bloque de medición de distancia, procesarla y ordenar los distintos avisos.

La unidad de procesamiento utilizada es una Raspberry Pi Pico, que integra el microcontrolador RP2040. La elección de este microcontrolador se debe a su capacidad de procesamiento, flexibilidad para la programación y disponibilidad de recursos, lo que lo hace adecuado para la implementación de sistemas embebidos de control y ayuda a la operación. Además, el uso de una placa ampliamente documentada como es la Raspberry Pi Pico facilita tanto el desarrollo del firmware como la posterior implementación en hardware real.

Desde el punto de vista arquitectónico, el microcontrolador actúa como elemento central de interconexión entre los bloques del sistema, gestionando tanto las entradas procedentes de los sensores como las salidas hacia los elementos de visualización y de aviso visual y acústico. La lógica de funcionamiento implementada sobre esta unidad se describe en detalle en el capítulo dedicado al desarrollo de firmware.

3.1.3. Bloque de comunicación del estado

El bloque de comunicación del estado tiene como objetivo transmitir de forma clara e intuitiva la información generada por el sistema, permitiendo al usuario conocer en todo momento la situación de proximidad detectada. Este bloque constituye la interfaz directa entre el sistema y el operador, y su diseño resulta clave para garantizar la utilidad práctica del sistema.

El sistema contempla distintos canales de comunicación complementarios, que permiten reforzar el mensaje transmitido y adaptarlo a diferentes condiciones de uso. En particular, se emplean indicadores visuales mediante LEDs, señalización acústica a través de un buzzer, y la visualización de información en una pantalla LCD.

En cuanto a la señalización visual mediante LEDs, el sistema utiliza una codificación por colores asociada a zonas de proximidad. Cada LED representa un nivel de aviso distinto, de forma que la iluminación de uno u otro indicador informa al operador de manera inmediata sobre la cercanía del obstáculo. Más en concreto, se utiliza un LED verde para indicar una situación segura, un LED amarillo para informar del estado de precaución y un LED rojo para informar del estado de peligro.

La señalización acústica, implementada mediante un avisador sonoro, en concreto un buzzer, complementa la información visual proporcionando un aviso adicional cuando el obstáculo se encuentra dentro de determinadas zonas de proximidad. La cadencia o intensidad del aviso acústico se asocia de forma directa al nivel de proximidad detectado, permitiendo al operador identificar la gravedad de la situación incluso sin contacto visual directo con el sistema.

Por último, la pantalla LCD se utiliza para mostrar información más detallada sobre el estado del sistema, incluyendo la distancia exacta de medida y el nivel de peligrosidad relacionado. Esta información permite una comprensión más precisa de la situación, manteniendo al mismo tiempo una presentación clara y accesible para el usuario

Desde el punto de vista de la arquitectura, este bloque recibe de la unidad de procesamiento una representación del estado operativo del sistema y la transforma en señales perceptibles para el operador. La lógica de activación, priorización y combinación de los distintos medios de aviso se gestiona desde la unidad de procesamiento, mientras que el bloque de comunicación se limita a ejecutar físicamente dichas órdenes.

3.1.4. Bloque de alimentación

El bloque de alimentación es el encargado de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de todos los elementos del sistema, incluyendo la unidad de procesamiento, los sensores de distancia y los dispositivos de comunicación del estado. Su diseño debe garantizar un suministro estable y adecuado a las distintas necesidades eléctricas del sistema, contribuyendo a un funcionamiento fiable en las condiciones de uso previstas.

El sistema se alimenta mediante una única fuente de 5 V. Esta tensión alimenta directamente a la Raspberry Pi Pico a través del pin VSYS, el cual incorpora un regulador interno que genera los 3,3 V necesarios para la lógica del sistema y de los sensores. Los dispositivos que requieren 5 V, como el sensor ultrasónico, el LCD o el buzzer, se alimentan directamente desde la fuente principal. Además, todas las masas del sistema se encuentran referenciadas a un mismo potencial común.

Desde el punto de vista arquitectónico, el bloque de alimentación se concibe como la fuente común de alimentación al resto de bloques, proporcionando las tensiones requeridas de forma continua y segura.

3.2. Interfaz del sistema

Las interfaces del sistema definen cómo interactúan entre sí los distintos bloques funcionales, estableciendo los flujos de información y energía necesarios para el funcionamiento global. La definición clara de estas interfaces permite desacoplar el diseño de los bloques, facilita la simulación y validación del sistema y sirve como base para su posterior implementación hardware y software.

Se pueden distinguir dos tipos de interfaces, las funcionales, que describen qué información se intercambia entre bloques, e interfaces hardware-software, que delimitan la frontera entre los elementos físicos y la lógica de control.

3.2.1. Interfaces funcionales entre bloques

Las interfaces entre bloques describen el tipo de información intercambiada entre los distintos bloques del sistema, independientemente de su implementación concreta. En la siguiente tabla (Tabla 4. Interfaces funcionales entre bloques) se resumen las principales interfaces funcionales definidas en el sistema.

Origen	Destino	Información intercambiada
Medición de distancia	Procesamiento y control	Información de distancia
Procesamiento y control	Comunicación del estado	Nivel de aviso
Procesamiento y control	Comunicación del estado	Información del estado y distancia
Alimentación	Todos los bloques	Energía eléctrica

TABLA 4. INTERFACES FUNCIONALES ENTRE BLOQUES

3.2.2. Interfaz entre el bloque de medición y la unidad de procesamiento

La interfaz entre el bloque de medición de distancia y el bloque de procesamiento se define como una interfaz de adquisición de datos, mediante la cual se transmite un valor representativo de la distancia al obstáculo detectado.

Esta interfaz se entiende como un canal de entrada de datos hacia el microcontrolador, sin depender de la tecnología que haya generado la magnitud. De esta manera se recibe la información de la distancia independientemente del sensor que haya generado la medida.

3.2.3. Interfaz entre el procesamiento y el bloque de comunicación

La interfaz entre la unidad de procesamiento y el bloque de comunicación del estado permite transmitir el estado operativo del sistema al operador. Esta interfaz se basa en señales de control que gobiernan los distintos elementos de aviso, tales como indicadores luminosos, señalización acústica y visualización en pantalla.

A nivel funcional, la información transmitida a través de esta interfaz no consiste únicamente en valores numéricos, sino en una codificación del estado del sistema, asociada a zonas de proximidad y niveles de aviso. Esta aproximación facilita una comunicación clara y coherente del estado, manteniendo separada la lógica de decisión de la ejecución física del aviso.

3.2.4. Interfaz hardware–software

El sistema presenta una frontera claramente definida entre el hardware y el software, que permite abordar su desarrollo de forma estructurada. El hardware proporciona los medios físicos para la adquisición de la información de distancia y la generación de los avisos, mientras que el software implementa la lógica de control y decisión que gobierna el comportamiento dinámico del sistema.

Esta separación permite que la arquitectura del sistema se mantenga independiente de los detalles de implementación, facilitando la simulación en un entorno virtual y el desarrollo progresivo del firmware sin necesidad de modificar la estructura global del sistema.

4. IMPLEMENTACIÓN EN PROTEUS

La implementación en Proteus se organiza siguiendo la misma arquitectura funcional que la del prototipo real y que se ha comentado anteriormente: bloque de medición de distancia, bloque de procesamiento y bloque de salida/avisos. En la siguiente imagen (Fig. 2. Sistema completo en Proteus) se puede observar el sistema electrónico realizado en Proteus en el que se distinguen claramente las interconexiones de señales y buses.

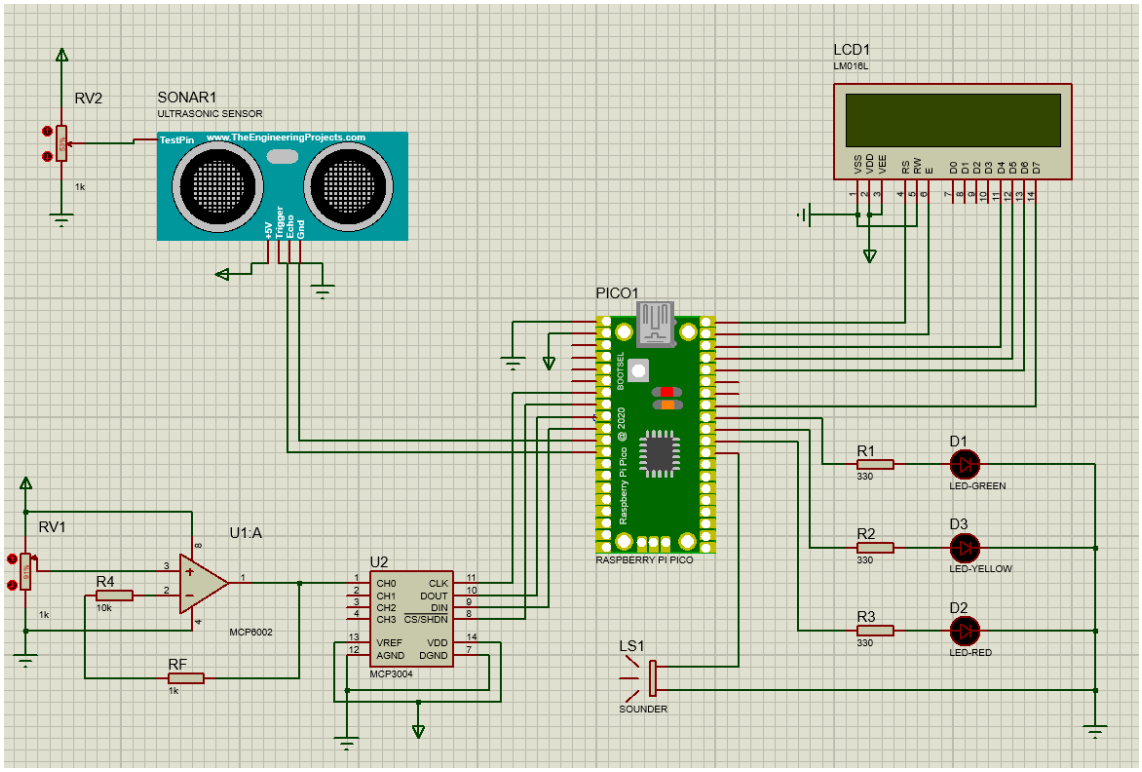


FIG. 2. SISTEMA COMPLETO EN PROTEUS

A continuación, se explicarán los distintos componentes del sistema por bloques:

4.1. Sensores de medición de distancia

Como se ha comentado anteriormente, se utilizan dos sensores, el ToF (VL53L1X) para distancias de 0 a 120 cm y el ultrasonidos (HC-SR04) para distancias de 120 a 200 cm. A continuación, vamos a desarrollar cada uno de ellos:

4.1.1. Sensor VL53L1X

El sensor VL53L1X se encarga de la detección de objetos en el rango de 0 a 120 cm. Este sensor no dispone de un modelo funcional en la librería estándar de Proteus ni de sensores ToF equivalentes, por lo que se analizaron diferentes opciones:

- **Importación de modelos SPICE** [42]**:** esta opción resulta adecuada para componentes analógicos o de potencia, pero no es viable en el caso del VL53L1X, ya que se trata de un sensor digital con procesamiento interno y sin un modelo SPICE público que describa su funcionamiento.
- **Creación de dispositivos mediante VSM (Virtual System Modelling):** Proteus permite desarrollar modelos personalizados utilizando VSM, combinando esquemas, scripts y

código embebido que simule el comportamiento de un dispositivo. Para esta opción se comenzó realizando el componente como se muestra en la Fig. 3. Modelo VSM. Una vez creado hay que programar la lógica interna del sensor lo que requería de un esfuerzo considerable y de unos conocimientos específicos del entorno que se alejaban de los objetivos y el alcance del proyecto.

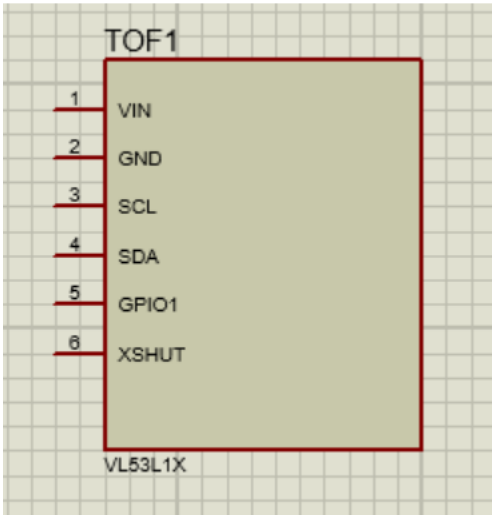


FIG. 3. MODELO VSM

Además, incluso si se lograse un modelo detallado, el beneficio obtenido en términos de validación funcional del sistema sería limitado, ya que el proyecto no pretende analizar el funcionamiento interno del sensor ToF, sino su integración dentro del sistema.

- **Modelo sustituto del ToF**: se ha decidido implementar un modelo sustituto que permite emular su comportamiento y validar la lógica del sistema en fase de simulación. La Fig. 4. Modelo sustituto del ToF muestra este modelo sustituto, compuesto por un potenciómetro, un amplificador operacional y un convertidor analógico-digital (ADC).

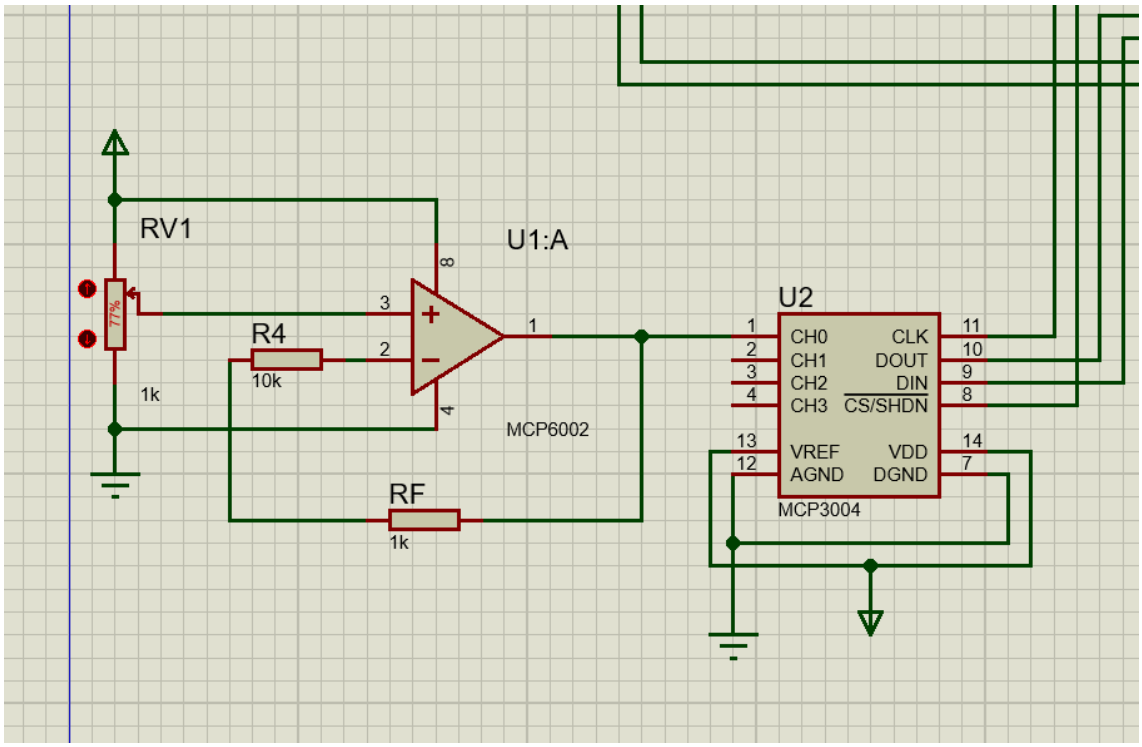


FIG. 4. MODELO SUSTITUTO DEL TOF

Este modelo se basa en:

- Un potenciómetro que permite simular la distancias al objeto
- Un amplificador operacional que acondiciona la señal
- Un convertidor analógico-digital que general el valor digital que va a leer el microcontrolador.

En el modelo sustituto se define una relación lineal entre la distancia simulada y la señal eléctrica generada. Esta relación se expresa como:

$$V(d) = \frac{3.3}{120} * d$$

Donde:

- V (d) es la tensión analógica equivalente
- d es la distancia en centímetros (0 – 120 cm)

Tras la conversión analógica-digital, el microcontrolador obtiene un valor digital proporcional a la distancia, que se emplea directamente en la lógica de control del sistema. La elección de una relación lineal permite simplificar el tratamiento de datos y la validación de los umbrales de decisión definidos en el proyecto.

Aunque el modelo sustituto cumple su función dentro del entorno de simulación, presenta una serie de limitaciones frente al VL53L1X real:

- No se reproduce la comunicación I2C ni los registros internos del sensor.
- La relación distancia-señal es ideal y estrictamente lineal.
- No se simulan tiempos de integración ni retardos propios del ToF.

- La resolución depende del ADC utilizado, y no de los modos configurables del sensor real.

El objetivo del proyecto no es el estudio del sensor VL53L1X en sí mismo, sino su integración dentro de un sistema basado en la distancia al obstáculo. Por tanto, la solución adoptada representa un compromiso adecuado entre realismo, complejidad y utilidad práctica, alineado con el alcance y los objetivos de este TFM.

4.1.2. Sensor HC-SR04

Este sensor es utilizado por el sistema para la detección de objetos en el rango de 120 a 200 cm, complementando al sensor ToF empleado para distancias cortas. En la Fig. 5. Sensor HC-SR04 se muestra de una manera más clara el esquema correspondiente a esta parte dentro del entorno de simulación:

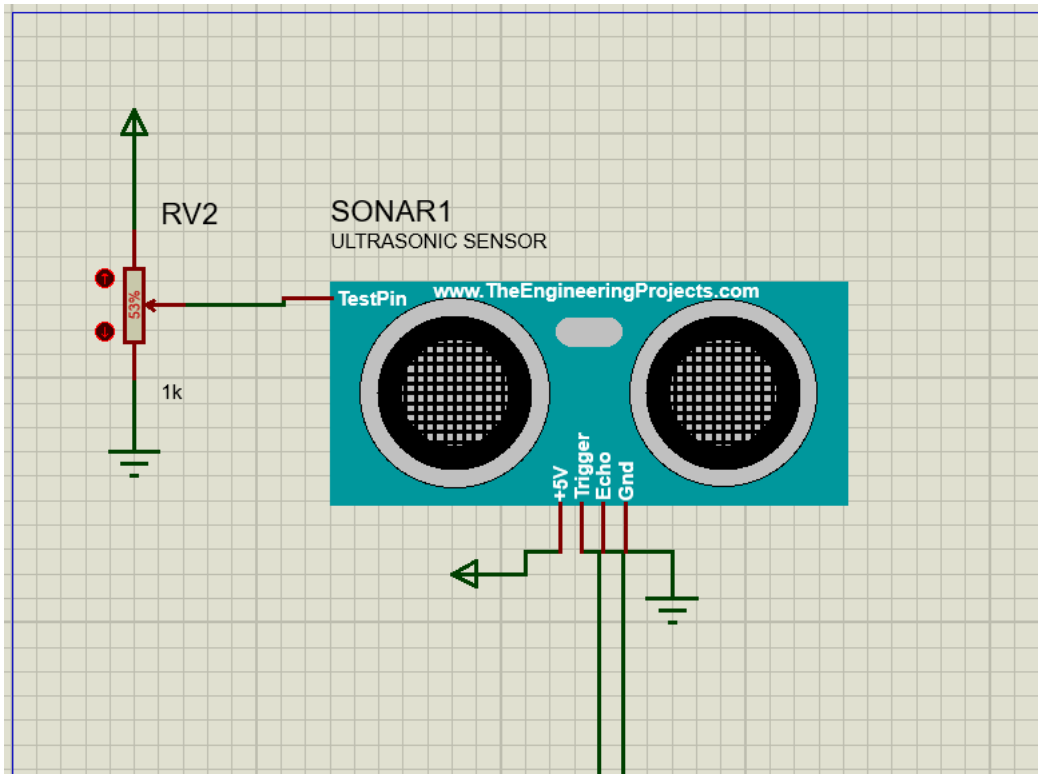


FIG. 5. SENSOR HC-SR04

Este sensor ultrasónico no se encuentra disponible en la librería estándar de Proteus. Por este motivo, se ha utilizado un modelo externo descargado de repositorios especializados [43], el cual reproduce el pinout y el comportamiento funcional del sensor.

[44] El sensor HC-SR04 basa su funcionamiento en la emisión de un pulso ultrasónico a través del pin Trigger y la posterior recepción del eco reflejado en el pin Echo. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso es proporcional a la distancia al objeto, permitiendo calcularla mediante la velocidad de propagación del sonido en el aire.

En el sistema, el microcontrolador genera el pulso de disparo por el pin Trigger y mide la duración del pulso de retorno en el pin Echo, a partir de la cual se obtiene la distancia al obstáculo.

4.1.2.1. Simulación de la distancia en Proteus

Dado que en el entorno de simulación no existe un objeto físico que refleje la señal ultrasónica, Proteus permite emular el comportamiento del sensor HC-SR04 mediante un pin test (TestPin). En este diseño, dicho pin se controla mediante un potenciómetro (RV2), el cual simula de forma continua la variación de la distancia medida por el sensor.

Al modificar la posición del potenciómetro:

- Se altera el valor aplicado al TestPin
- El modelo HC-SR04 ajusta internamente el tiempo del pulso de salida en el pin Echo
- El microcontrolador interpreta este tiempo como una distancia variable, equivalente a la que proporcionaría el sensor en un entorno real

El sensor se conecta al microcontrolador de la siguiente forma:

- Trigger: conectado a un pin digital configurado como salida
- Echo: conectado a un pin digital configurado como entrada para la medición de tiempos
- Vcc y GND: alimentación del módulo según las especificaciones del sensor

La Raspberry Pi Pico procesa la señal de Echo utilizando temporizadores internos, calculando la distancia correspondiente y determinando si debe emplearse este sensor o el sensor ToF en función del rango de medición. En el diseño global, el HC-SR04 se activa únicamente cuando la distancia supera el límite superior del sensor ToF (120 cm).

Este bloque permite verificar en Proteus el comportamiento del sistema ante distancias medias, permitiendo verificar el correcto funcionamiento del firmware antes de su implementación en hardware real.

4.2. Raspberry Pi Pico

El bloque de procesamiento del sistema se implementa mediante el microcontrolador RP2040 integrado en la placa Raspberry Pi Pico, que actúa como unidad central de control. Este bloque se encarga de adquirir la información procedente de los sensores, procesarla y generar las señales de salida correspondientes.

Este microcontrolador no se encuentra de forma nativa en las librerías estándar de Proteus. No obstante, es posible importar un modelo externo [45], lo que permite su utilización dentro del esquema y su interconexión con el resto de bloques del sistema. El modelo utilizado se muestra en la Fig. 6. Raspberry Pi Pico:

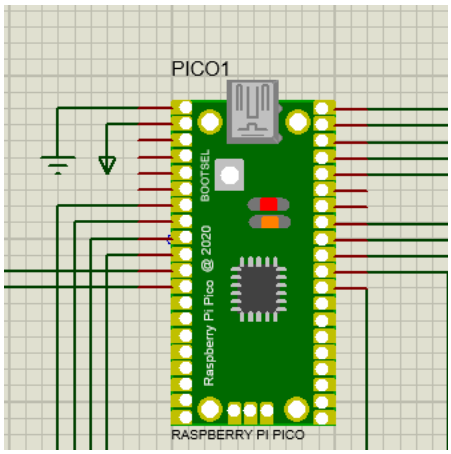


FIG. 6. RASPBERRY PI PICO

El RP2040 actúa como elemento central del sistema y cumple con las siguientes funciones principales:

- **Adquisición de datos de los sensores**: recibe la información de distancia de ambos sensores (ToF y ultrasonidos)
- **Procesamiento y toma de decisiones**: a partir de la distancia medida, el microcontrolador determina la zona de operación en la que se encuentra el obstáculo, aplicando la lógica definida en el sistema.
- **Generación de señales de salida**: controla los distintos elementos de aviso del sistema (LEDs, buzzer y LCD)
- **Gestión de interfaces**: coordina las distintas interfaces utilizadas en el sistema (entradas y salidas digitales, comunicación serie con el ADC, control del display), garantizando el funcionamiento coherente del conjunto.

En el sistema, la Raspberry Pi Pico se conecta a los distintos bloques del sistema de la siguiente forma:

- **Entradas**: señal digital de echo del HC-SR04 y datos procedentes del ADC que representa el ToF.
- **Salidas**: señal de disparo (Trigger) del sensor ultrasónico y señales de control de los LEDs y el buzzer.
- **Comunicación**: líneas de control y datos para el display LCD.
- **Alimentación**: alimentación de 5V y referencia de masa comunes al resto del sistema

Esta distribución permite al microcontrolador centralizar el control del sistema y coordinar el funcionamiento de todos los bloques.

4.3. Comunicación del sistema

Como se ha comentado anteriormente, la comunicación del sistema con el entorno se realiza a través de LEDs, buzzer y la pantalla LCD. A continuación, se describe la implementación de cada uno de estos elementos.

4.3.1. Comunicación visual mediante LEDs

El bloque de señalización visual del sistema está formado por tres diodos LED de distinto color (verde, amarillo y rojo), cuya función es proporcionar al usuario una indicación inmediata y fácilmente interpretable del estado del sistema en función de la distancia

medida. Cada LED representa una zona de proximidad diferente, permitiendo identificar de forma intuitiva el nivel de riesgo o cercanía del obstáculo al sistema de la siguiente forma:

- **LED verde**: indica que el objeto se encuentra a una distancia segura (150 – 200 cm)
- **LED amarillo**: indica una distancia intermedia, en la que se recomienda la precaución (80 – 150 cm)
- **LED rojo**: indica una distancia corta, correspondiente a una situación de mayor riesgo (< 80 cm)

Cada LED se conecta a una salida digital del microcontrolador, lo que permite su control individual mediante el firmware. En la Fig. 7. LEDs, los cátodos de los LEDs se conectan a masa común, mientras que los ánodos se conectan a los pines de salida del microcontrolador a través de resistencias:

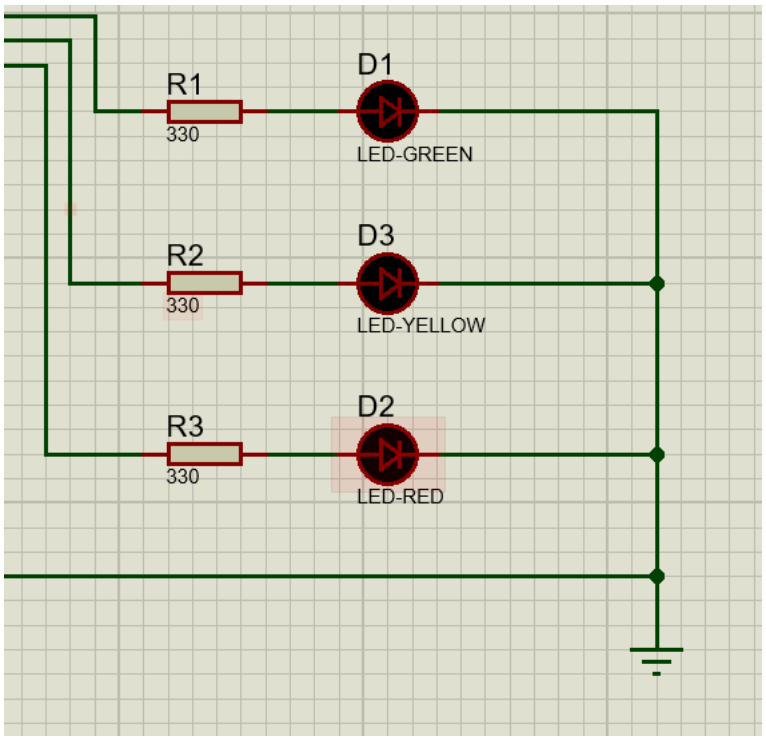


FIG. 7. LEDS

Cada LED incorpora una resistencia de 330 Ω, cuya función es limitar la corriente que circula a través del diodo y proteger tanto al LED como al pin de salida del microcontrolador. El valor de 330 Ω se ha seleccionado considerando la tensión de alimentación típica de 3.3 V y una corriente de funcionamiento segura para los pines del microcontrolador, lo que proporciona un valor adecuado para la luminosidad y seguridad eléctrica, siendo un valor comúnmente utilizado en sistemas embebidos.

4.3.2. Señalización acústica

El sistema incorpora un buzzer como elemento de aviso acústico, cuyo objetivo es proporcionar una señal sonora complementaria a la señalización visual. Este aviso acústico permite alertar al usuario incluso cuando no está observando directamente el sistema.

El buzzer indica el nivel de proximidad al obstáculo mediante un aviso acústico progresivo, de forma que la frecuencia o el ritmo del sonido varía en función de la distancia medida. De forma general:

- A grandes distancias, el buzzer permanece apagado o emite señales muy espaciadas.
- A distancias intermedias, el sonido se activa de forma intermitente.
- En distancias cortas, el aviso acústico se intensifica y suena de manera continuada.

El buzzer se conecta directamente a una salida del microcontrolador, compartiendo referencia de masa con el resto del sistema. Como se puede observar en la Fig. 8. Buzzer, el terminal negativo se conecta a masa y el terminal positivo, a un pin de salida del microcontrolador:

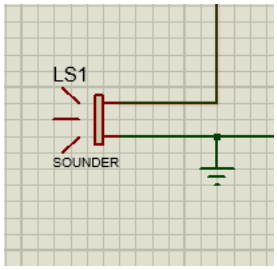


FIG. 8. BUZZER

El control del patrón de aviso acústico (duración, repetición o frecuencia) se gestiona íntegramente por software, lo que permite adaptar fácilmente el comportamiento del sistema sin modificar el hardware.

4.3.3. Visualización mediante display LCD

El sistema incorpora un display LCD alfanumérico LM016L (16x2) como elemento de visualización de la información. Este módulo permite mostrar información textual y numérica relacionada con el estado del sistema y la distancia detectada. El display LCD se emplea para mostrar información relevante como la distancia medida al obstáculo y el estado del sistema según la zona de proximidad.

El LM016L se conecta al microcontrolador siguiendo una configuración clásica de control por pines paralelos, tal y como se muestra en la Fig. 9. Display LCD.

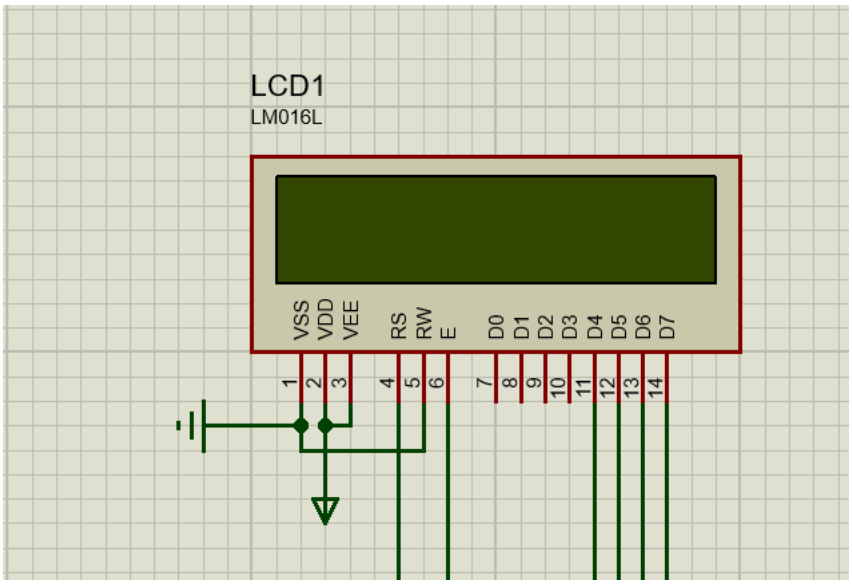


FIG. 9. DISPLAY LCD

Las conexiones principales son:

- **VSS (pin 1):** conectado a masa
- **VDD (pin 2):** conectado a la tensión de alimentación
- **VEE (pin 3):** utilizado para el ajuste del contraste del display (en el esquema se fija a un nivel constante)
- **RS (pin 4):** selección entre registro de comandos y registro de datos.
- **RW (pin 5):** conectado a masa, configurando el display en modo escritura.
- **E (pin 6):** señal de habilitación del LCD
- **D4-D7 (pines 11-14):** líneas de datos para la transmisión de información hacia el display

En el entorno de Proteus, este modelo permite simular de forma visual el resultado de las operaciones del sistema, facilitando la verificación del correcto funcionamiento de la lógica de control antes de su implementación en hardware real.

5. FIRMWARE

El firmware desarrollado tiene como objetivos gestionar la adquisición de datos, procesarlos y generar avisos al usuario en tiempo real. Para ello, el microcontrolador se encarga de leer de forma periódica los sensores de distancia del sistema y transformar dicha información en señales de aviso visuales y acústicas.

Además, el firmware implementa la lógica de decisión del sistema, estableciendo umbrales de distancia que definen distintas zonas de seguridad. En función de estas zonas, se controlan los LEDs, el buzzer y el contenido mostrado en el display LCD. Todo el proceso se ejecuta de forma cíclica, asegurando un comportamiento continuo y fiable durante el funcionamiento del sistema.

5.1. Arquitectura del firmware

El firmware se ha diseñado siguiendo una arquitectura modular y basada en una ejecución secuencial, en la que cada bloque cumple con una función bien definida dentro del flujo general de información. Esta organización facilita la comprensión del funcionamiento del sistema, así como su depuración y posible ampliación futura.

En la Fig. 10. Diagrama de flujo del sistema se puede observar el diagrama de flujo del sistema. A grandes rasgos, el firmware se estructura en tres niveles funcionales. En primer lugar, el nivel de adquisición, encargado de obtener las medidas de distancia de los sensores disponibles. En segundo lugar, el nivel de procesado y decisión, donde se validan las medidas, se selecciona el sensor adecuado y se determina la zona de seguridad correspondiente. Finalmente, el nivel de actuación y visualización transforma esta decisión en señales visuales, acústicas y de texto.

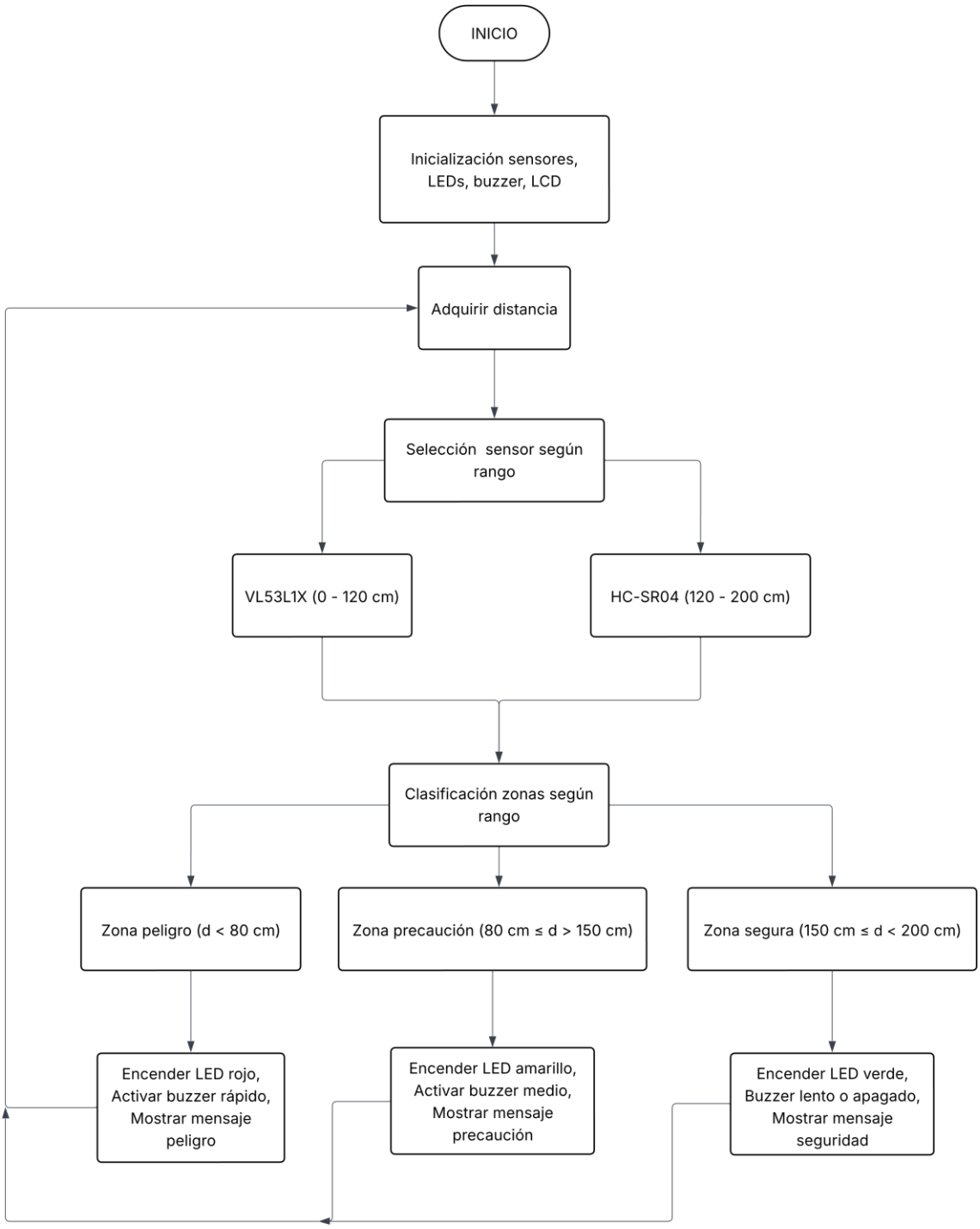


FIG. 10. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

El funcionamiento del sistema se basa en un bucle principal que se ejecuta de forma continua tras la fase de inicialización. En cada iteración se realiza una nueva adquisición de datos, se procesa la información obtenida y se actualizan las salidas del sistema. Así, se garantiza una respuesta en tiempo real y un comportamiento coherente ante los cambios de distancia detectados.

5.2. Adquisición de datos

La adquisición de datos del sistema consiste en obtener, de forma periódica, una medida de distancia en centímetros que represente la posición del obstáculo frente al conjunto de sensores. Para cubrir el rango completo del proyecto (0 – 200 cm) se utilizan dos fuentes de medida: un ToF para distancias más cortas (0 – 120 cm) y un sensor ultrasónico para distancias mayores (120 – 200 cm). El objetivo de esta etapa es proporcionar una distancia final única que se utilizará posteriormente para clasificar por zonas y generar alertas.

En cada iteración, el firmware realiza la lectura de ambos sensores, valida y limita sus valores y selecciona la distancia más adecuada en función de su rango de trabajo. Este enfoque permite mantener una medida continua y estable, aprovechando las ventajas de cada sensor.

5.2.1. Lectura del ToF

La lectura del "ToF" se obtiene como una señal analógica que es digitalizada mediante un convertidor analógico-digital MCP3004. El firmware implementa una comunicación SPI por "bit-banging" para leer el canal correspondiente de ADC, limitando el valor a 10 bits (0 – 1023). Posteriormente se realiza un mapeo lineal para expresar la lectura directamente en centímetros dentro del rango del ToF (0 – 120 cm), definido por la constante TOF_MAX_CM.

A continuación, se muestra el fragmento representativo para leer el ToF:

```
int leerToFcm() {
  int adc = readMCP3004(0);
  adc = constrain(adc, 0, 1023);
  return map(adc, 0, 1023, 0, TOF_MAX_CM);
}
```

5.2.2. Lectura ultrasonidos

El procedimiento consiste en generar un pulso de disparo en el pin TRIG y medir el tiempo del eco recibido en el pin ECHO mediante pulseIn(). A partir de este tiempo se calcula la distancia aproximada en centímetros utilizando la relación estándar:

$$d = \frac{t}{58}$$

Donde t es el tiempo del pulso en microsegundos.

En simulación, el valor máximo obtenido se ajusta a través de una constante de calibración (ULTRA_MAX_REAL), con el fin de adaptar el comportamiento del modelo de Proteus al rango objetivo.

A continuación, el firmware realiza un mapeo de esta lectura al rango completo (0-200 cm) y, posteriormente, restringe la salida al intervalo 120-200 cm, de forma que el HC-SR04 actúe como "sensor de continuidad" cuando el ToF alcanza su límite superior.

La función implementada se muestra a continuación:

```
long leerUltrasonidosCm() {
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

  long duracion = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
  long distancia = duracion / 58;
  return constrain(distancia, 0, ULTRA_MAX_REAL);
}

int leerUltrasonidos_120a200() {
  long d = leerUltrasonidosCm();

  // 0-1116 → 0-200
  long d_0a200 = map(d, 0, ULTRA_MAX_REAL, 0, DIST_MAX_MAP);

  // forzar 120-200
  return constrain(
    map(d_0a200, 0, DIST_MAX_MAP, TOF_MAX_CM, DIST_MAX_MAP),
    TOF_MAX_CM,
    DIST_MAX_MAP
  );
}
```

5.2.3. Selección distancia final

Una vez disponibles las lecturas, el firmware calcula una distancia final única aplicando una regla simple de selección: si la medida del ToF es menor que el rango máximo definido (TOF_MAX_CM = 120 cm)) se emplea como distancia final. En caso contrario, se utiliza la medida del sensor ultrasónico, ya adaptado a su rango.

Función implementada para calcular la distancia final:

```
int calcularDistanciaFinal() {
  int dToF = leerToFcm();

  if (dToF < TOF_MAX_CM) {
    return dToF;                  // 0-120
  } else {
    return leerUltrasonidos_120a200(); // 120-200
  }
}
```

5.3. Filtrado, estabilización y temporización

El sistema realiza la adquisición y actualización del estado del sistema de forma cíclica dentro del bucle principal. En la implementación actual se ha fijado un retardo de 200 ms,

lo que establece una frecuencia de actualización aproximada de 5 Hz. Esta temporización resulta adecuada para un sistema de aviso visual/acústico, ya que permite una respuesta rápida para el usuario sin necesidad de actualizar el LCD o las salidas a una frecuencia excesiva, evitando parpadeos y oscilaciones perceptibles.

No obstante, debido a la naturaleza de los sensores de distancia pueden aparecer pequeñas fluctuaciones o lecturas atípicas que provocan inestabilidad en la clasificación por zonas cerca de los umbrales definidos (80 cm y 150 cm). Para mejorar la robustez del sistema se incorpora un filtrado en dos etapas: mediana (N=5) [46] para eliminar outliers (valores atípicos) y media móvil exponencial (EMA) [47] para suavizar la evolución de la distancia y estabilizar el comportamiento del sistema.

5.3.1. Temporización del lazo de control

El firmware ejecuta las siguientes acciones en cada iteración: lectura de distancia, decisión de zona y actualización de salidas (LEDs, buzzer y LCD). El retardo fijo al final del bucle (delay (200)) define el periodo de muestreo aproximado:

- Periodo: T ≈ 200 ms
- Frecuencia: f ≈ 1/T ≈ 5 Hz

Este periodo establece también el "paso temporal" del filtrado, ya que el algoritmo de estabilización (mediana + EMA) procesa una muestra por ciclo. Con una ventana N=5, el sistema necesita aproximadamente 1 segundo para disponer de una ventana completa (5 ciclos). Este tiempo de llenado inicial solo afecta a la fase de arranque del sistema, tras la cual el filtrado opera en régimen permanente.

5.3.2. Filtrado en dos etapas: mediana (N=5) + EMA (α)

Con el objetivo de aumentar la estabilidad de la señal de distancia y evitar cambios erráticos en la clasificación por zonas, se aplica filtrado un filtrado en dos etapas sobre las lecturas de distancia de cada sensor.

En primer lugar, se emplea un filtro de **mediana** con una ventana de tamaño N=5, en el que se mantienen las últimas cinco lecturas y se calcula el valor central. Este filtro es robusto frente a picos aislados (outliers), ya que un valor anómalo no altera significativamente el resultado.

A continuación, sobre la salida del filtro de mediana, se aplica una **media móvil exponencial (EMA),** cuyo objetivo es suavizar la evolución temporal de la señal, reduciendo las oscilaciones en torno a los umbrales.

La expresión de la EMA se define como:

$$EMA_n = \alpha * x_n + (1 - \alpha) * EMA_{n-1}$$

donde x_n es la muestra actual (en este caso, la mediana) y α es el factor de suavizado, que determina la velocidad a la que la media responde a los cambios de valor. En este proyecto se ha utilizado un valor de $\alpha = 0{,}25$, lo que proporciona un valor adecuado entre estabilidad y capacidad de respuesta.

La implementación del filtrado se realiza mediante buffers circulares para almacenar las muestras y una actualización iterativa de la EMA en cada ciclo de ejecución. A

continuación, se muestra un fragmento representativo del proceso de actualización de la media exponencial:

```
float emaUpdate(float prev, float x) {
  return ALFA_EMA * x + (1.0f - ALFA_EMA) * prev;
```

El código completo del filtrado, incluyendo la gestión de buffer y el cálculo de la mediana, estaría entre las líneas 37 y 159 del código incluido en el Anexo A. Código del firmware

5.3.3. Efecto de filtrado y justificación

El comportamiento observado al modificar bruscamente la entrada (potenciómetro) es que la distancia filtrada no cambia instantáneamente, sino que converge progresivamente hacia el nuevo valor. Este efecto es intencionado y se debe principalmente a la EMA, que introduce una inercia controlada. La ventaja directa es que el sistema evita respuestas abruptas, reduciendo parpadeos del LCD, alternancia rápida de LEDs cerca de umbrales y activaciones/desactivaciones repetitivas del buzzer.

En la Tabla 5. Evolución distancia α = 0,25 se puede ver la evolución temporal de la distancia filtrada ante un cambio brusco de la entrada. Puede observarse que la distancia no alcanza el nuevo valor de forma instantánea, sino que converge progresivamente a lo largo de varios ciclos de muestreo. En este caso, partiendo de una distancia inicial de 10 cm, el sistema alcanza valores próximos a 120 cm tras aproximadamente 13 ciclos, lo que equivale a unos 2,6 s con un periodo de muestreo de 200 ms. Este comportamiento permite reducir cambios abruptos y oscilaciones en los umbrales de decisión, mejorando la estabilidad del sistema a costa de una latencia moderada y aceptable.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia filtrada (cm)
0	0	10
1	0,2	37
2	0,4	57
3	0,6	82
4	0,8	93
5	1	100
6	1,2	105
7	1,4	109
8	1,6	112
9	1,8	114
10	2	116
11	2,2	117

12	2,4	119
13	2,6	120

TABLA 5. EVOLUCIÓN DISTANCIA A = 0,25

En la Tabla 6. Evolución distancia α = 0,3 se cambia a α = 0.3 para observar el comportamiento del filtrado:

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia filtrada (cm)
0	0	43
1	0,2	65
2	0,4	80
3	0,6	94
4	0,8	104
5	1	109
6	1,2	113
7	1,4	116
8	1,6	118
9	1,8	119
10	2	120

TABLA 6. EVOLUCIÓN DISTANCIA A = 0,3

A partir de los resultados obtenidos, se observa que al incrementar el valor de α el sistema converge más rápidamente hacia el valor final. Con α=0,25 se requieren aproximadamente 13 ciclos (≈2,6 s), mientras que con α=0,30 el asentamiento se alcanza en torno a 10 ciclos (≈2,0 s). Este comportamiento es característico de un sistema de primer orden.

Por tanto, α permite ajustar el compromiso entre suavizado y velocidad de respuesta; valores mayores reducen la latencia, a costa de una menor atenuación del ruido. En este proyecto se selecciona α=0,25 como valor equilibrado para priorizar estabilidad en los umbrales, manteniendo una respuesta suficientemente rápida.

Cabe destacar que el análisis se ha realizado en entorno de simulación, validando el comportamiento funcional del algoritmo de filtrado. No obstante, la caracterización precisa del ruido y el ajuste fino de parámetros se plantea como trabajo futuro con hardware real.

5.4. Umbrales, lógicas de decisión y alertas

Una vez obtenida la distancia filtrada mediante el proceso descrito en el apartado anterior, el firmware aplica una lógica de decisión basada en umbrales de distancia para clasificar la situación del sistema y generar las alertas correspondientes. Esta lógica constituye el núcleo del comportamiento funcional del sistema, ya que traduce una magnitud física continua (distancia) en señales discretas fácilmente interpretables por el usuario.

La clasificación se realiza en tiempo real dentro del bucle principal, evaluando en cada iteración la distancia actual y actualizando de forma coherente los indicadores visuales y acústicos.

5.4.1. Definición de umbrales y zonas de seguridad

Como se ha descrito previamente, se han definido tres zonas de seguridad en función de la distancia al obstáculo, utilizando dos umbrales principales: la **z**ona de peligro (distancia inferior a 80 cm), la zona de precaución (distancia comprendida entre 80 cm y 150 cm) y la zona segura (distancia igual o superior a 150 cm)

Estos valores se han seleccionado teniendo en cuenta el rango de funcionamiento del sistema y el objetivo de proporcionar una advertencia progresiva al usuario. La separación en tres zonas permite diferenciar claramente situaciones de riesgo inmediato, aproximación moderada y condición segura.

Los umbrales se definen mediante constantes en el firmware, lo que facilita su ajuste o adaptación a otros escenarios sin modificar la estructura del código:

```
const int UMBRAL_PELIGRO = 80;
const int UMBRAL_SAFE    = 150;
```

5.4.2. Lógica de decisión

La lógica de decisión se implementa mediante una estructura condicional secuencial (if / else if / else) que evalúa la distancia filtrada calculada en cada ciclo. En función del resultado de esta evaluación, el sistema entra implícitamente en uno de los estados definidos (peligro, precaución o seguro).

Aunque no se ha implementado una máquina de estados formal, el comportamiento del sistema puede interpretarse como tal, ya que cada zona activa un conjunto específico de salidas y desactiva las restantes.

5.4.3. Alertas visuales mediante LEDs

El sistema emplea tres LEDs de distinto color para indicar visualmente el estado actual, LED rojo para la zona de peligro, LED amarillo para la zona de precaución y LED verde para la zona segura.

Para cada iteración del bucle principal, todos los LEDs se apagan inicialmente y se activa únicamente el correspondiente a la zona detectada. Este método garantiza coherencia entre estados y evita que queden LEDs encendidos por estados anteriores.

Tanto el apagado como el encendido se realizan con la función digitalWrite ()

5.4.4. Alertas acústicas mediante buzzer

Además de la indicación visual, el sistema incorpora una señal acústica para reforzar la advertencia al usuario, especialmente en situaciones de riesgo. El buzzer se controla en función de la zona detectada:

- **Zona de peligro**: señal acústica continua y de mayor frecuencia
- **Zona de precaución**: señal intermitente de menor frecuencia
- **Zona segura**: buzzer desactivado

Esta diferenciación permite transmitir no solo la presencia de un obstáculo, sino también el grado de urgencia, aumentando la efectividad del sistema de aviso.

La activación del buzzer se realiza mediante la función tone (), utilizando distintas frecuencias y duraciones para cada zona.

5.4.5. Visualización en el display LCD

El display LCD proporciona información textual y numérica al usuario. En la primera línea se muestra la distancia actual en centímetros, mientras que en la segunda línea se indica el estado del sistema mediante un mensaje descriptivo (“DANGER”, “CAUTION” o “SAFE”).

La actualización del LCD se realiza una vez por ciclo del bucle principal, lo que, junto con la temporización definida (200 ms) y el filtrado de la distancia, evita parpadeos y asegura una lectura estable.

La información que se visualiza se realiza mediante la función lcd.print (), mostrando en cada momento la distancia en cm y el estado del sistema. Además, se añaden espacios al final de cada línea para evitar restos de texto de actualizaciones anteriores.

A continuación, se muestra el fragmento representativo de la lógica de control de alarmas.

```
// Lógica alarmas

 if (distanciaFinal < UMBRAL_PELIGRO) {
   digitalWrite(LED_ROJO, HIGH);
   lcd.print("DANGER       ");
   tone(BUZZER_PIN, FREC_PELIGRO);
 }
 else if (distanciaFinal < UMBRAL_SAFE) {
   digitalWrite(LED_AMARILLO, HIGH);
   lcd.print("CAUTION      ");
   tone(BUZZER_PIN, FREC_CAUTION, 100);
 }
 else {
   digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
   lcd.print("SAFE         ");
 }
```

Para facilitar la comprensión del funcionamiento global la siguiente tabla resume las salidas asociadas a cada zona:

Zona	Distancia	LED	Buzzer	LCD
Peligro	d < 80 cm	Rojo	Continuo	“DANGER”
Precaución	80 ≤ d < 150 cm	Amarillo	Intermitente (100 ms)	“CAUTION”
Seguro	150 cm ≤ d	Verde	Apagado	“SAFE”

TABLA 7. RESUMEN FUNCIONAMIENTO GLOBAL

De este modo, el sistema proporciona al usuario una indicación clara y concisa del nivel de proximidad, facilitando la toma de decisiones durante la operación.

6. DISEÑO PCB

Durante la fase inicial del proyecto, el sistema fue validado mediante simulación en Proteus empleando modelos funcionales equivalentes tanto de los sensores como del microcontrolador. En este entorno, el objetivo principal era comprobar el funcionamiento general del sistema incluyendo la lectura de distancias y la activación de los elementos de señalización (LEDs y buzzer).

Sin embargo, la simulación representa un modelo ideal del sistema, en el que no se tienen en cuenta ciertos fenómenos eléctricos propios de una implementación real, como impedancias de línea, corrientes transitorias, ruido eléctrico, retornos de corriente o la necesidad de polarización en buses open-drain.

Por este motivo, al realizar el diseño de la PCB se han sustituido los modelos funcionales empleados en simulación por conectores físicos que representan la interconexión real con los distintos módulos del sistema. En concreto, se han definido conectores para la Raspberry Pi Pico, el sensor ToF y el sensor ultrasónico tal y como se puede observar en Fig. 11. Adaptación a modelo físico.

Esta decisión permite que la placa diseñada represente fielmente el sistema físico final y no los elementos auxiliares utilizados únicamente con fines de simulación.

6.1. Adaptaciones necesarias en el paso al entorno físico

El paso del modelo ideal al diseño real requiere incorporar ciertos elementos eléctricos que no son necesarios en simulación, pero que sí son imprescindibles en la implementación real.

6.1.1. Inclusión de resistencias pull-up en el bus I²C

En el entorno de simulación, las líneas del bus I²C pueden funcionar sin modelar explícitamente las resistencias de polarización. Sin embargo, en un sistema real, el protocolo I²C utiliza salidas de tipo open-drain, lo que implica que los niveles lógicos altos deben generarse mediante resistencias pull-up externas.

El microcontrolador RP2040 dispone de resistencias internas configurables, [20] pero el fabricante especifica que estas pueden no ser suficientemente cuando se conectan dispositivos externos. Además, su valor típico (50–80 kΩ) resulta elevado para un bus I²C estándar

Por este motivo, se han incorporado resistencias pull-up externas de 4.7 kΩ conectadas a 3.3 V en las líneas SDA y SCL como se pueden observar en la Fig. 11. Adaptación a modelo físico. Esta elección garantiza tiempos de subida adecuados y el funcionamiento estable del bus.

Asimismo, se ha tenido en cuenta que algunos módulos comerciales del sensor ToF pueden integrar estas resistencias de forma interna. Por ello, se ha previsto la posibilidad de no montar las resistencias en la PCB en caso necesario, evitando así duplicidades en el circuito.

6.1.2. Inclusión de condensadores de desacoplo

En simulación, la fuente de alimentación se modela como ideal y libre de ruido. Sin embargo, en un sistema físico real, las variaciones transitorias de corriente pueden

provocar caídas momentáneas de tensión y generar interferencias que afectarían al funcionamiento del circuito.

Para reducir estos efectos, se han añadido condensadores de desacoplo entre 3.3 V y GND en distintos puntos del sistema. En concreto, se han colocado el conector del módulo ToF y en la entrada de alimentación procedente de la Raspberry Pi Pico como se muestra en la Fig. 11. Adaptación a modelo físico.

Se ha utilizado una combinación de condensadores de distinta capacidad para cubrir diferentes rangos de frecuencia. El condensador de 100 nF actúa como filtro de alta frecuencia, reduciendo ruido rápido y transitorios breves, mientras que el condensador de mayor capacidad (4,7 µF) ayuda a estabilizar la tensión frente a variaciones de corriente más lentas.

La inclusión de estos elementos mejora la robustez eléctrica del sistema y reduce la probabilidad de fallos asociados a perturbaciones en la alimentación.

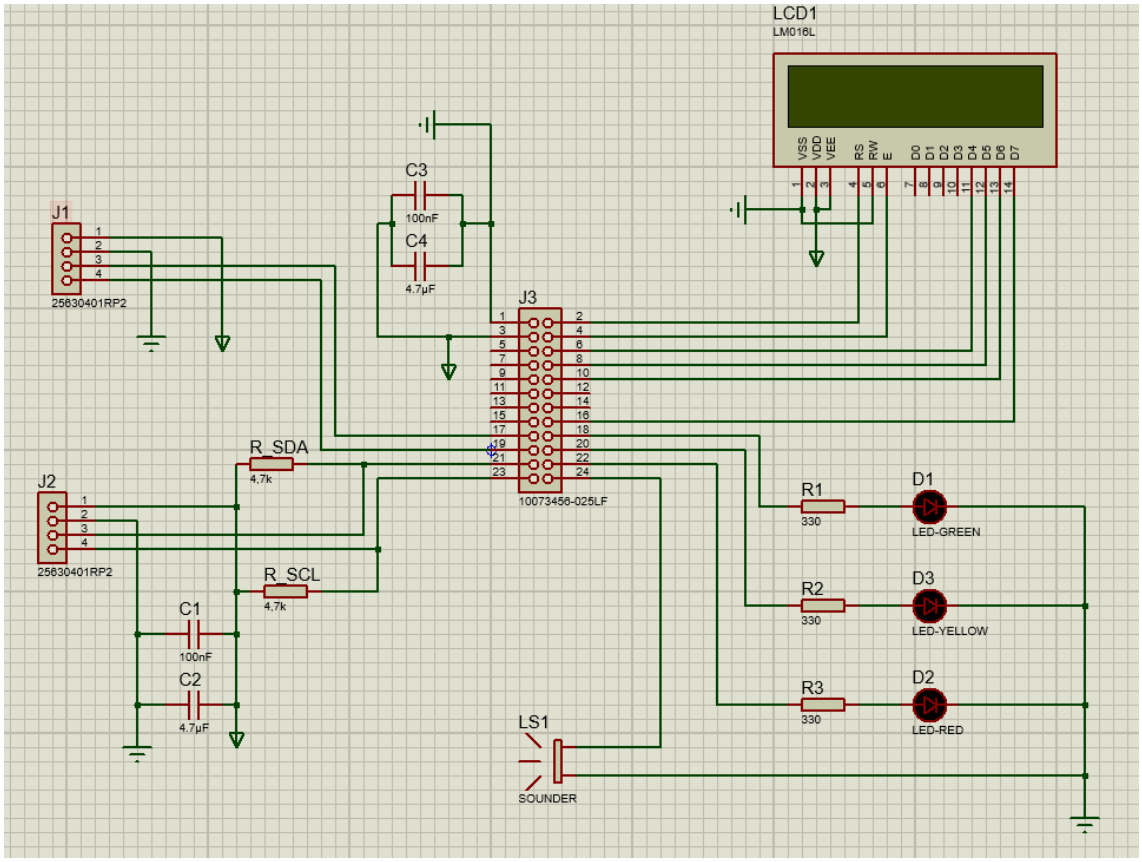


FIG. 11. ADAPTACIÓN A MODELO FÍSICO

6.2. Distribución de capas y ruteado

El diseño PCB se ha realizado en dos capas, siguiendo una estrategia de distribución basada en criterios de simplicidad constructiva. El resultado se puede observar en la Fig. 12. Ruteado inicial de la PCB.

La organización adoptada ha sido la siguiente:

- La capa inferior (Bottom Copper, azul) se ha destinado al ruteado de la red de masa (GND).
- La capa superior (Top Copper, rojo) se ha utilizado para el ruteado de las líneas de alimentación y señales digitales.

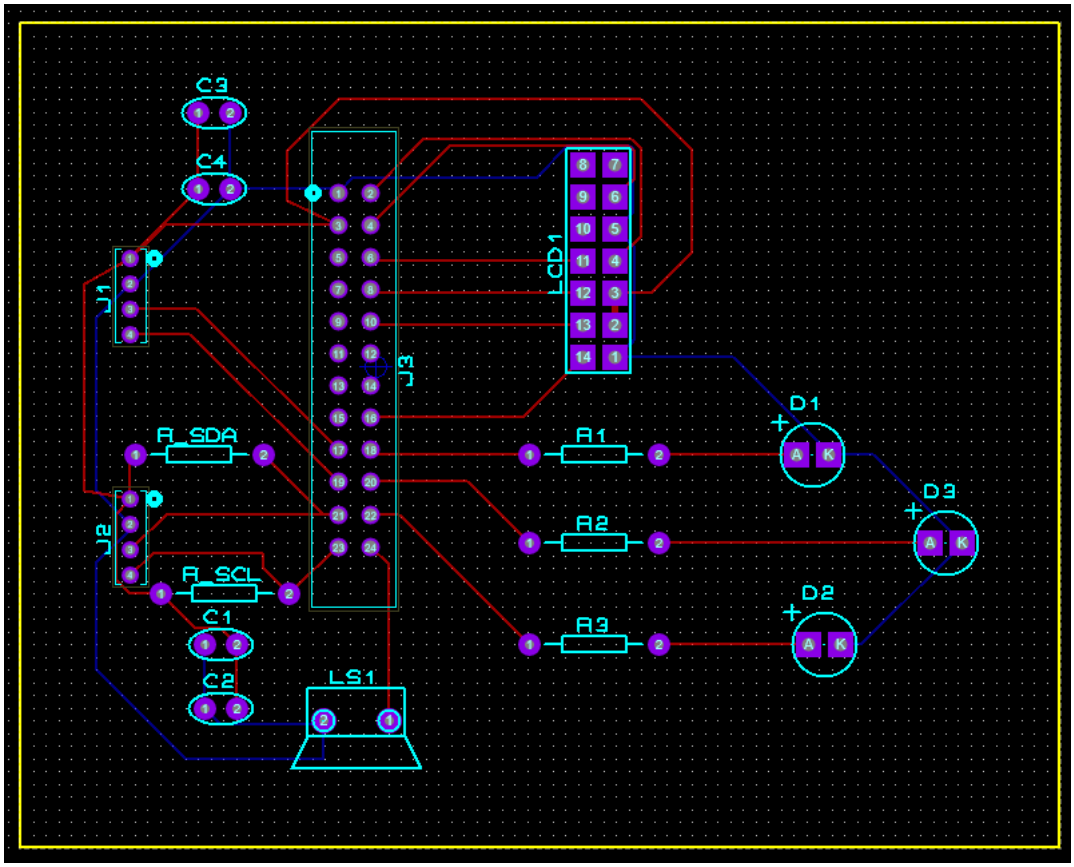


FIG. 12. RUTEADO INICIAL DE LA PCB

Esta decisión se debe a un criterio fundamental en el diseño electrónico: toda señal necesita un camino de retorno y dicho retorno se produce a través de la red de masa (GND). Si este retorno no es continuo o se encuentra alejado de la señal, se generan bucles de corriente amplios, aumentando el ruido y degradando la integridad de la señal.

Al utilizar la capa inferior como plano de masa, las señales ruteadas en la capa superior disponen de una referencia inmediata debajo de ellas. De este modo, se reducen el área del bucle de corriente y se mejora la integridad eléctrica del sistema.

6.3. Implementación del plano de masa (Copper Pour)

[48] Con el objetivo de mejorar el comportamiento eléctrico del sistema, se ha implementado un plano de masa (GND) mediante la técnica de *copper pour* en la PCB. Este plano de masa es una superficie conductora que sirve como camino de retorno para las corrientes y como la referencia común para todas las señales del circuito.

El uso de planos de masa es una práctica habitual en diseño electrónico, incluso en sistemas de baja frecuencia, debido a los beneficios que aporta en términos de estabilidad y robustez. En este diseño, su implementación es importante debido a:

- Estabilización de la impedancia. Toda señal eléctrica necesita un camino de retorno. Un plano continuo estabiliza la impedancia de ese retorno y minimiza el área de los bucles de corriente.
- Reduce interferencias electromagnéticas. Al disminuir el tamaño de los bucles de corriente, se reduce la radiación electromagnética y la susceptibilidad al ruido externo.
- Mejora la estabilidad del bus I²C y de la alimentación. Las líneas digitales se referencian respecto a GND. Una referencia homogénea mejora la integridad de señal.
- Distribuye mejor la corriente de masa. En lugar de circular por pistas estrechas, la corriente se reparte por una superficie amplia.

Además, el plano de masa que se pueden observar en Fig. 13. Plano de cobre tiene las siguientes características:

- El plano de masa se ha configurado como relleno sólido (*solid copper pour*) en lugar de mallado (*hatched*) ya que presenta diferentes ventajas como menor impedancia, mayor continuidad eléctrica, mejor comportamiento frente a corrientes transitorias y una referencia más uniforme para las señales digitales.
- Se ha definido una separación (*clearance*) de 10th (0,254 mm) entre el plano de masa y el resto de redes del circuito para garantizar aislamiento eléctrico adecuado y prevención de cortocircuitos.

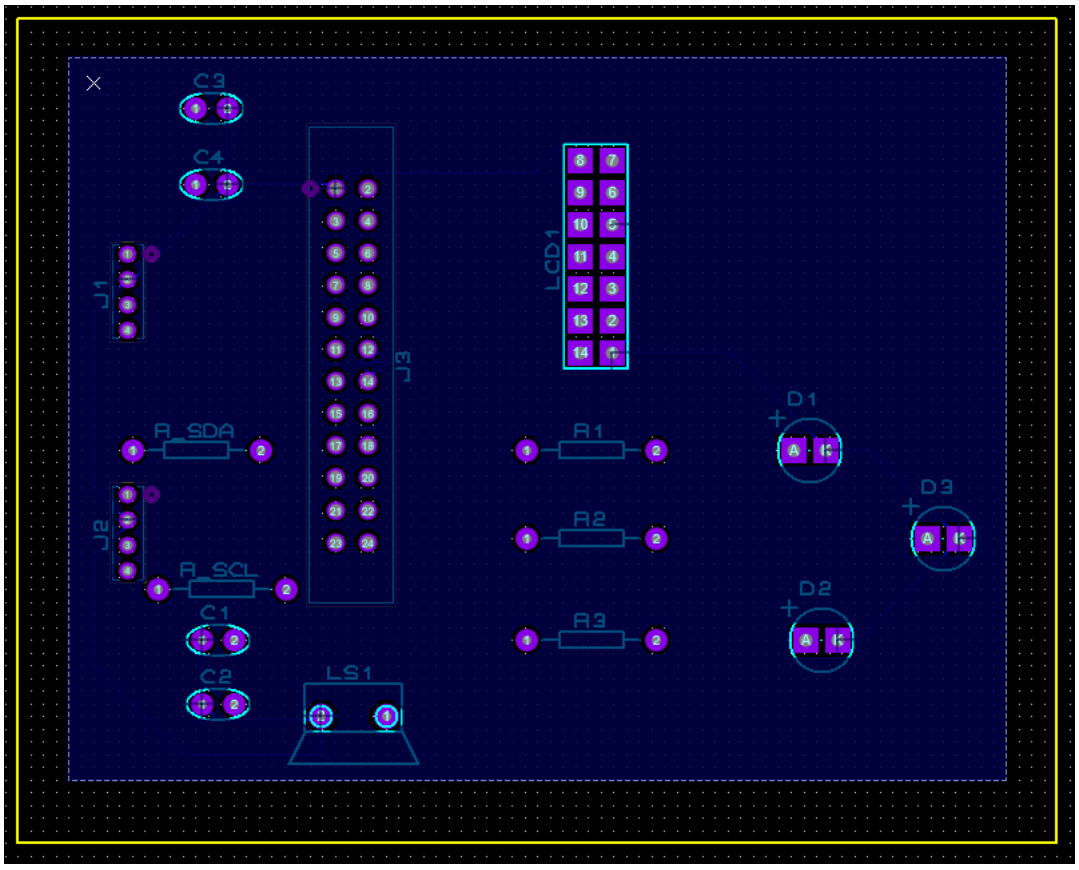


FIG. 13. PLANO DE COBRE

6.4. Visualización 3D

Con el objetivo de validar el diseño antes de una posible fabricación, se ha empleado la herramienta de visualización tridimensional de Proteus. Esta representación permite comprobar la disposición real de componentes y evaluar la ocupación de la superficie de la placa. Ambas capas de la PCB se pueden observar en la Fig. 14. Vista superior PCB y la Fig. 15. Vista inferior PCB.

En la vista superior se puede confirmar la correcta ubicación de los elementos más relevantes sistema. Destaca la proximidad de las resistencias pull-up a las líneas del bus I^2C y la ubicación de los condensadores de desacoplo junto a los puntos de alimentación. Asimismo, se observa una distribución ordenada de los elementos de señalización, sin cruces innecesarios.

Por su parte, la vista inferior permite comprobar la distribución de taladros y pads, asegurando un espaciado adecuado entre elementos y una correcta viabilidad mecánica del montaje.

Finalmente, en ambas vistas puede apreciarse en un tono diferenciado de verde la superficie correspondiente al plano de masa implementado mediante *copper pour*. Esta visualización permite confirmar las zonas donde el cobre se ha mantenido conectado a la red GND, evidenciando la continuidad del plano y su correcta integración en ambas capas.

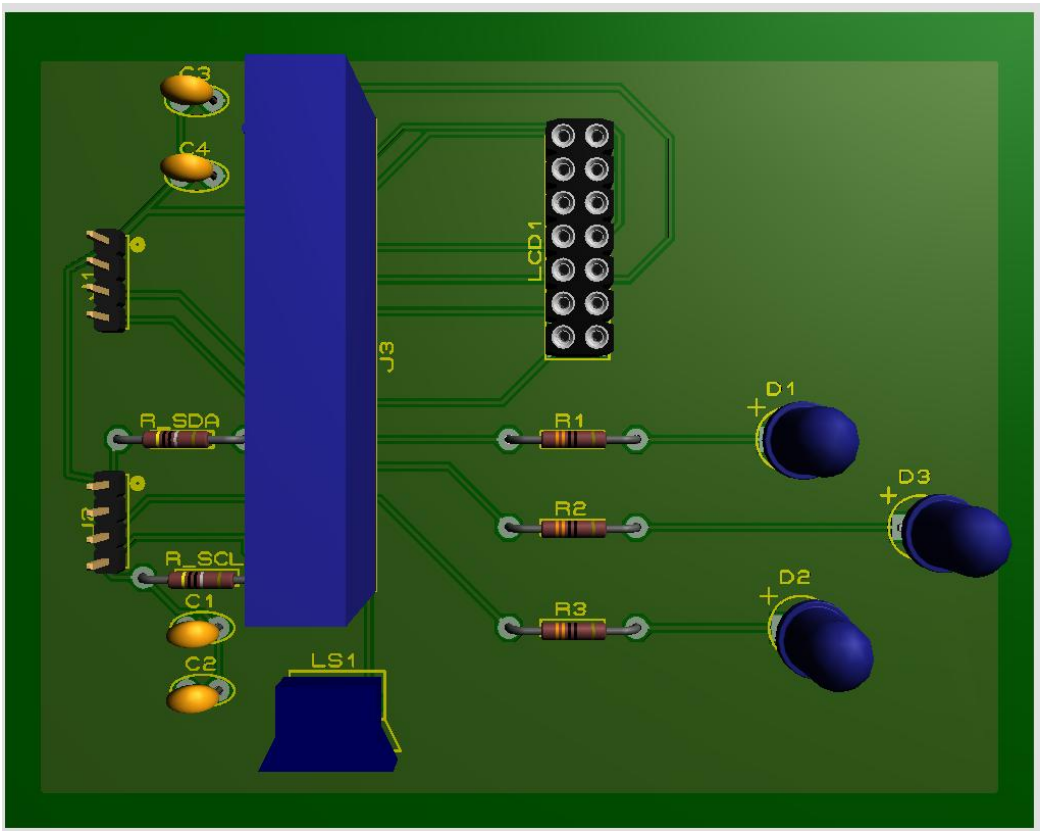


FIG. 14. VISTA SUPERIOR PCB

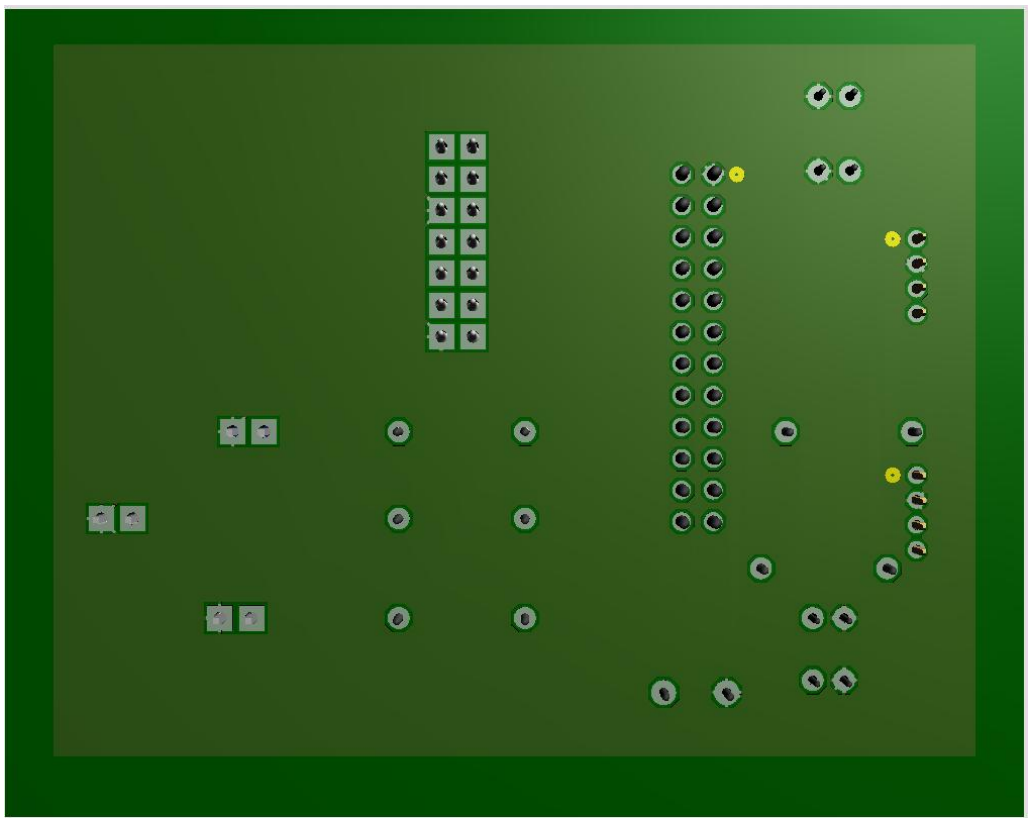


FIG. 15. VISTA INFERIOR PCB

7. Desarrollo en Altium Designer

Una vez realizado el desarrollo del sistema en Proteus, se ha procedido al desarrollo del diseño electrónico en Altium Designer, una herramienta profesional muy utilizada a nivel industrial y orientada al diseño de esquemáticos, placas de circuito impreso y documentación. El uso de este entorno permite trasladar el sistema a una implementación más realista y más profesional.

A diferencia de otras herramientas, Altium Designer ofrece un mayor control sobre aspectos como la creación de librerías personalizadas, definición de huellas físicas (footprints), el ruteado de pistas, la generación de planos de masa y la visualización tridimensional. Por ello, su utilización en este proyecto ha resultado especialmente adecuada para obtener una PCB más profesional y más alineada a una futura implementación física.

7.1. Desarrollo de librerías y componentes

Como fase previa al diseño del esquemático y de la PCB, es necesario disponer de una biblioteca de componentes adaptada a las necesidades del proyecto. En Altium Designer, cada componente electrónico se define mediante la integración de tres bloques principales: el símbolo esquemático, utilizado en el diagrama eléctrico, el footprint, utilizado en el desarrollo de la PCB, y el modelo tridimensional, empleado para la posterior visualización 3D de la placa. Por ello, hubo que realizar estas tres fases para todos los componentes de nuestro sistema y, a modo de ejemplo, la Fig. 16. Símbolo esquemático RP2040, la Fig. 17. Footprint RP2040 y la Fig. 18. Modelo tridimensional RP2040, muestran el desarrollo seguido para el microprocesador. En los siguientes apartados, se verán el resto de componentes de manera general.

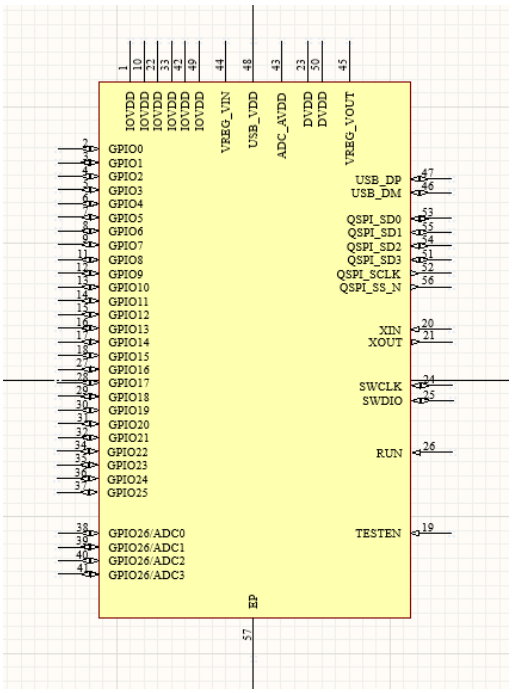


FIG. 16. SÍMBOLO ESQUEMÁTICO RP2040

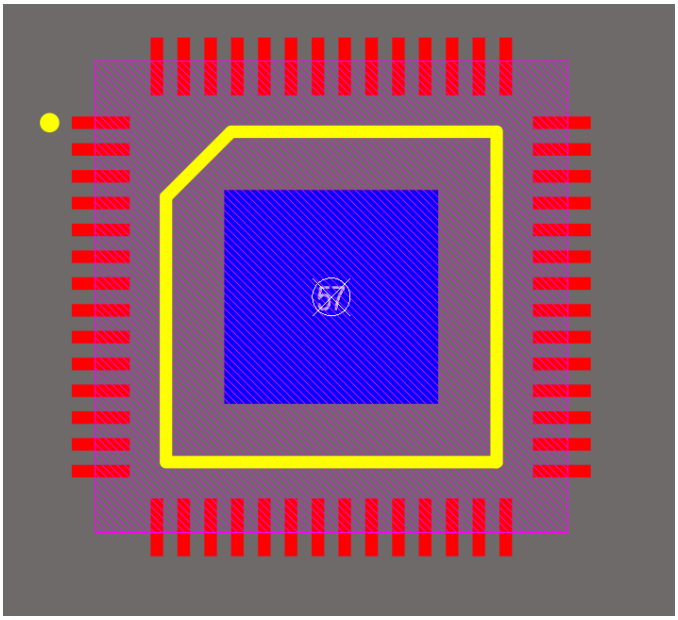


FIG. 17. FOOTPRINT RP2040

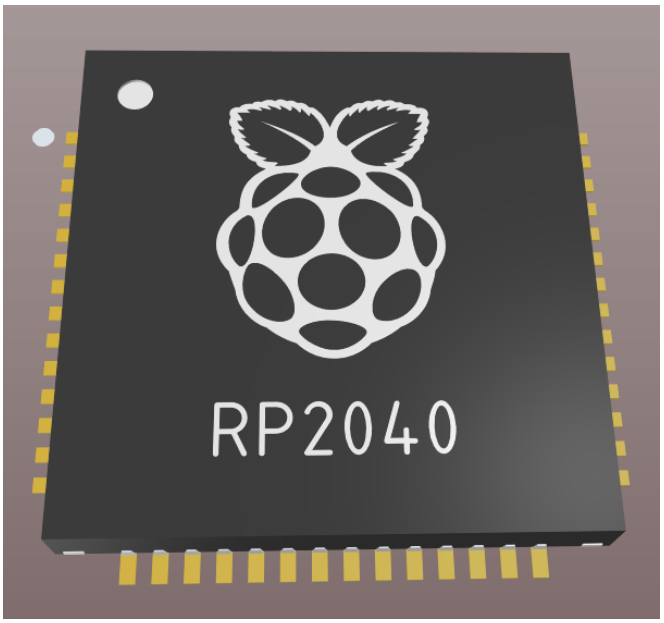


FIG. 18. MODELO TRIDIMENSIONAL RP2040

Para la creación de estas librerías se han combinado componentes creados manualmente (símbolo esquemático y footprint) con recursos obtenidos a través de plataformas especializadas como SnapEDA [49], 3D Content Central [50] o DigiKey [51], desde donde se descargan los modelos 3D compatibles con Altium para todos los componentes.

La creación y validación previa de la librería personalizada permite realizar las fases posteriores de diseño, asegurando que todos los componentes empleados en el proyecto están correctamente definidos.

7.2. Desarrollo del esquemático

La arquitectura general del sistema, así como las principales decisiones técnicas (selección de sensores, resistencias pull-up, desacoplos, distribución de alimentación y lógica de funcionamiento), fueron definidas y justificadas durante la fase de diseño en Proteus. Por este motivo, en esta etapa no se replantea el funcionamiento del sistema, sino que se traslada el diseño a un entorno orientado a la implementación física y a la fabricación de la PCB.
El esquemático desarrollado en Altium mantiene la funcionalidad de Proteus, incorporando una representación más realista y detallada en los componentes. En particular, para el microcontrolador RP2040 y para el sensor VL53L1X, se han utilizado símbolos esquemáticos con una definición de pines más próxima a los dispositivos reales que en Proteus, debido a la facilidad de crear nuestro propio símbolo.

De este modo, debido a esta representación, la disposición gráfica de algunos bloques del circuito ha sido reorganizada, aunque estos cambios afectan únicamente a la presentación del entorno, manteniéndose intacta la lógica global del sistema.

La Fig. 19. Esquemático Altium muestra el esquemático final desarrollado, el cual constituye la base directa para la generación del diseño de la placa de circuito impreso, proceso que se describe en el siguiente apartado.

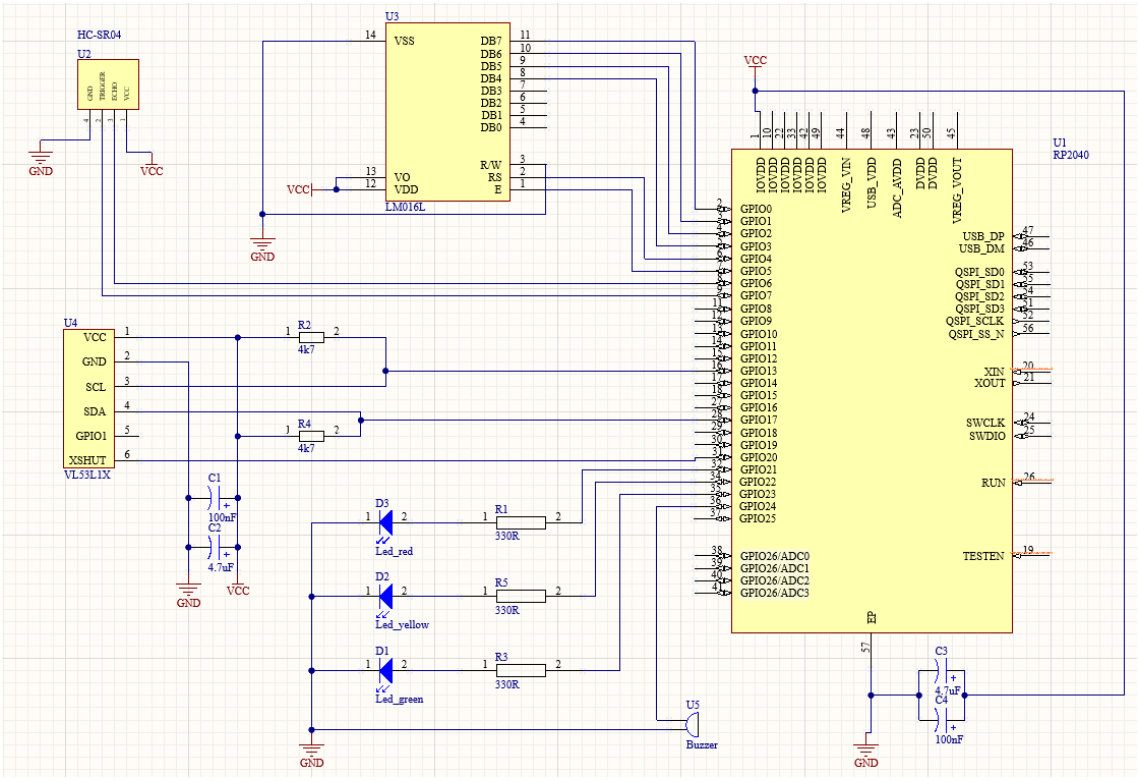


FIG. 19. ESQUEMÁTICO ALTIUM

7.3. Desarrollo PCB

A partir del esquemático desarrollado se ha procedido al diseño de la placa del circuito impreso. Al igual que en Protues, se realiza una PCB de dos capas, destinando la capa inferior al ruteado de la red de masa y, la superior, al ruteado de líneas de alimentación y las señales asociadas a la conexión de componentes.

La Fig. 20. Ruteado PCB Altium muestra el ruteado inicial de la PCB antes de la aplicación del plano de masa. Se puede observar una distribución de componentes diferentes tanto a Proteus como al esquemático de Altium, ya que está condicionada por un ruteado más realista de las conexiones.

Antes de rutar hay que estudiar con qué empresa se fabricaría la PCB. Esto es importante ya que cada empresa tiene sus propias especificaciones y te limitan en aspectos como el tamaño de las pistas. Se ha elegido el fabricante JLCPCB [52], una empresa china muy conocida y utilizada desde estudiantes y aficionados como por profesionales y que destacan por su producción rápida y económica.

Para el ruteado se ha utilizado un ancho de pista de 0,254 mm (10 mil), valor típico recomendado y que proporciona una conexión más robusta y un retorno de corriente más estable. Sin embargo, para las señales de entrada y de salida del microcontrolador RP2040, ha sido necesario utilizar pistas de 0,127 mm debido a la escasa separación entre pads.

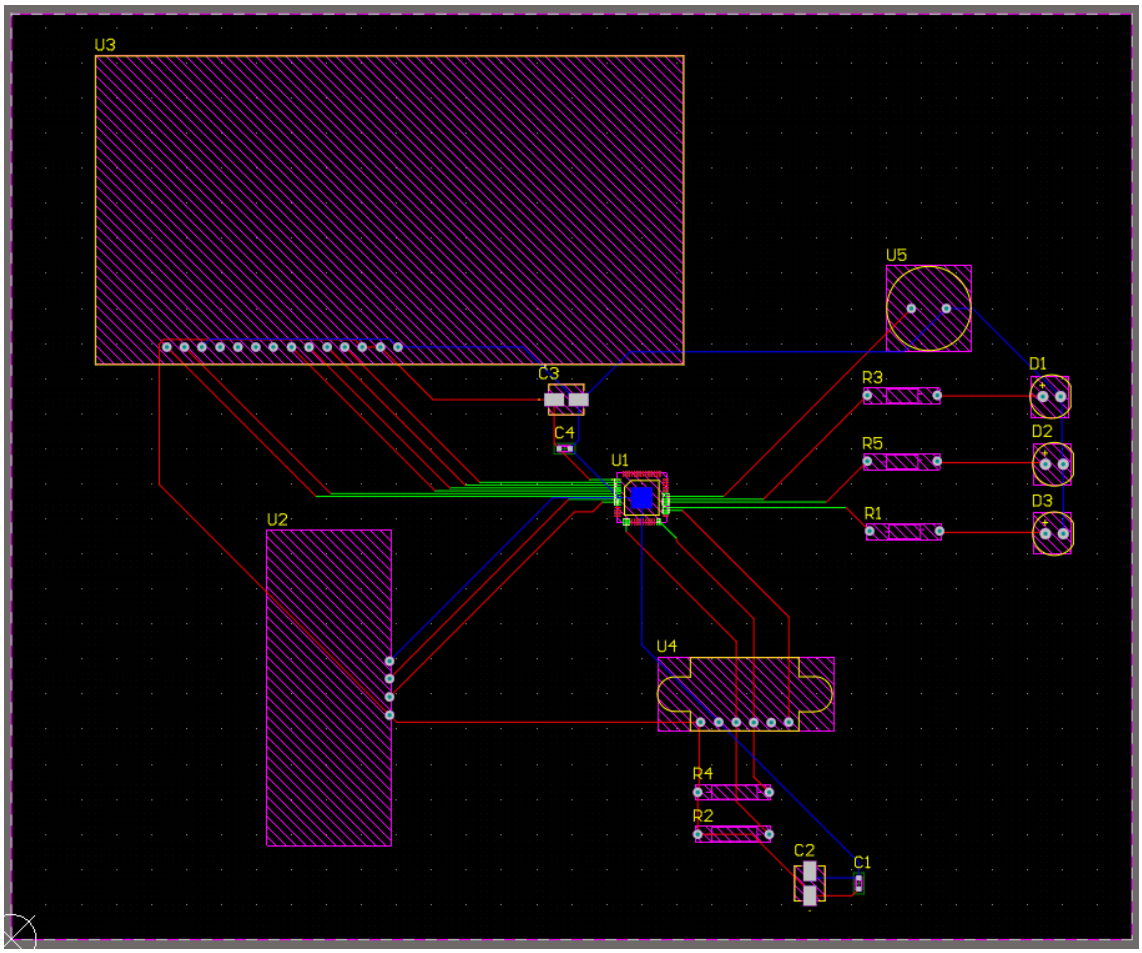


FIG. 20. RUTEADO PCB ALTIUM

Una vez completado el ruteado, se ha añadido el plano de masa mediante copper pour, siguiendo la misma filosofía a como se hizo en Proteus, es decir, con relleno sólido y una separación de 0,254 mm. Se puede visualizar en la Fig. 21. Copper pour Altium.

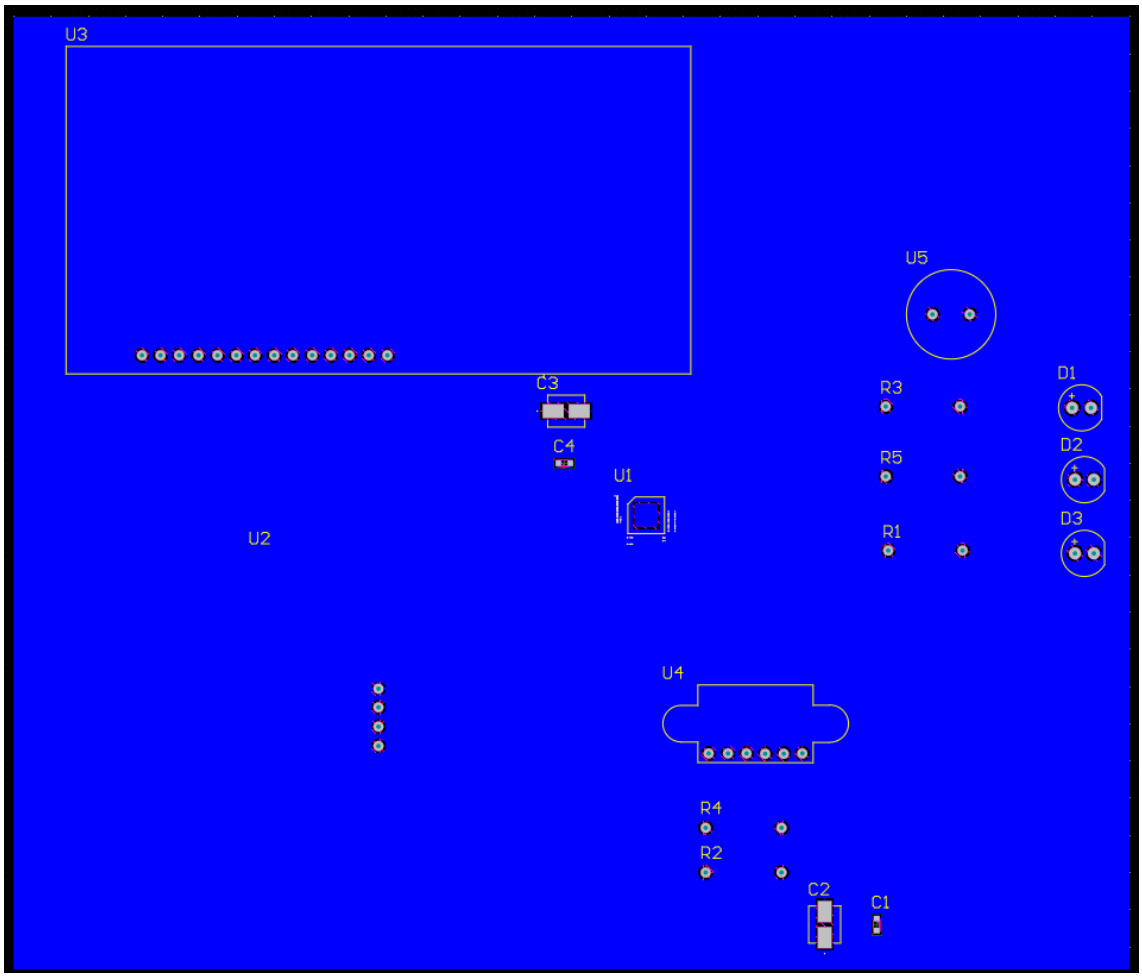


FIG. 21. COPPER POUR ALTIUM

7.4. Visualización 3D

Como validación final, Altium Designer también cuenta con la posibilidad de la visualización tridimensional que muestra lo realizado por el usuario al diseñar cada componente. Al igual que en Proteus se puede observar la colocación de los componentes del sistema, que coincide con la colocación en la PCB y se puede apreciar el plano de masa implementado. Ambas caras se pueden observar en la Fig. 22. Vista superior PCB Altium y la Fig. 23. Vista inferior PCB Altium.

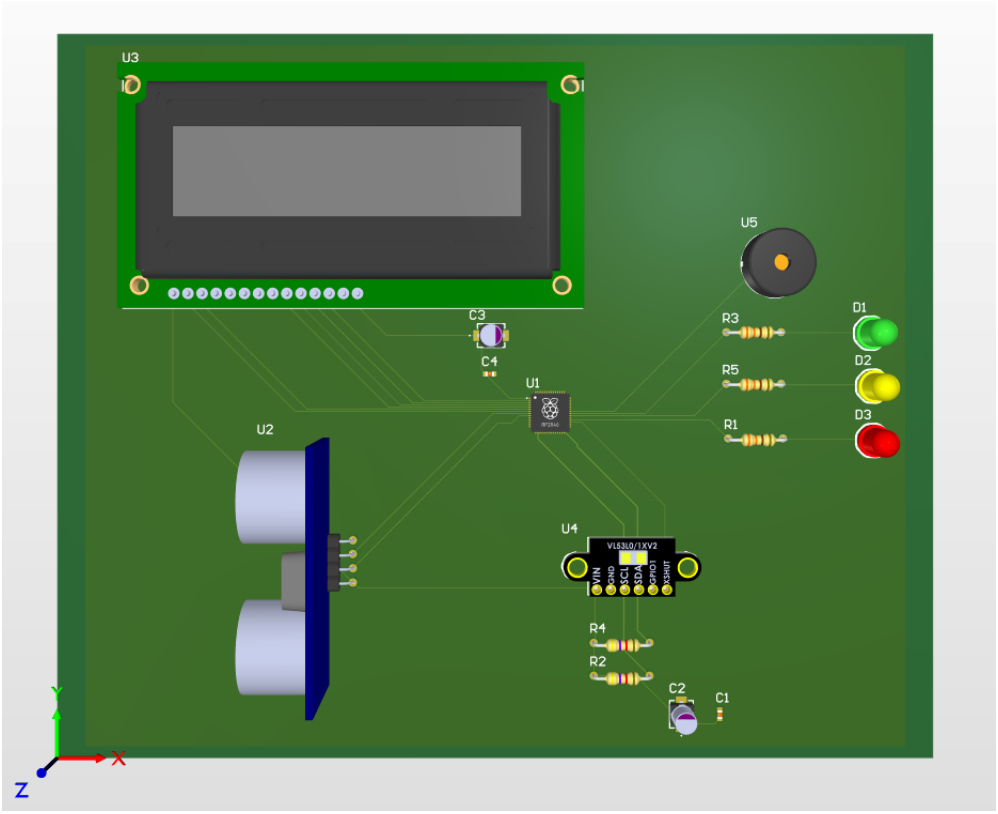


FIG. 22. VISTA SUPERIOR PCB ALTIUM



FIG. 23. VISTA INFERIOR PCB ALTIUM

7.5. Comparativa Altium vs Proteus

A lo largo del desarrollo del proyecto se han utilizado dos herramientas de diseño electrónico con enfoques similares y, a la vez, complementarios: Proteus y Altium Designer. Aunque ambas permiten trabajar con esquemáticos y placas de circuito impreso, su orientación principal y el nivel de profundidad ofrecido en cada fase del diseño son diferentes.

Proteus ha resultado especialmente útil a la hora de iniciar el proyecto, donde el objetivo principal era validar la lógica de funcionamiento del sistema, comprobar la interacción entre sensores y actuadores, y ejecutar el firmware. Su capacidad para combinar esquemáticos con la simulación lo convierte en una herramienta muy adecuada para el prototipado y las pruebas iniciales.

Por otra parte, Altium Designer se ha mostrado más útil en la fase de implementación física del sistema. La creación avanzada de librerías, el control detallado del ruteado, la gestión de reglas de diseño, la generación de planos de masa y la visualización tridimensional permiten desarrollar PCB más realistas y preparadas para la fabricación.

Es por ello que no se consideran herramientas excluyentes sino complementarias dentro del flujo de trabajo del proyecto. A continuación, se muestra una tabla comparativa entre ambos softwares:

Característica	**Proteus**	**Altium Designer**
Enfoque principal	Simulación y validación funcional	Diseño profesional PCB
Ejecución firmware y simulación	Permite cargar y comprobar código	No orientado a la simulación
Diseño esquemático	Correcto	Avanzado y escalable
Creación de librerías	Básico	Completo y flexible
Diseño footprints	Disponible	Profesional
Ruteado PCB	Para diseños sencillos	Para diseños complejos
Visualización 3D	Correcto	Realista
Generación de documentación	Limitado	Completo (Gerbers, ensamblado, etc.)
Curva de aprendizaje	Sencilla	Compleja
Uso en este proyecto	Validación lógica y simulación	Diseño PCB realista

TABLA 8. COMPARATIVA PROTEUS VS ALTIUM

La experiencia obtenida durante el desarrollo del proyecto confirma que la elección de ambas herramientas depende de la fase del proyecto. Para validar el comportamiento del sistema y depurar el firmware, Proteus ofrece una solución eficiente, mientras que para obtener una PCB profesional, Altium proporciona herramientas claramente superiores.

7.6. Bills of Materials (BOM)

Tanto en proteus como en Altium Designer también se puede realizar la lista de los materiales que se han utilizado en el proyecto. Este listado, mostrado en la tabla inferior (Tabla 9. Bills Of Materials), recoge los componentes necesarios para la implementación del sistema, junto con la información necesaria para su identificación y adquisición.

En concreto, las cuatro primeras columnas (Category, Quantity, Reference y Value) las generan las herramientas automáticamente al realizar el diseño. Las siguientes cuatro columnas se añaden para proporcionar información adicional. La columna Unit Cost representa el coste unitario estimado para un volumen de producción de 100 unidades, Supplier identifica el distribuidor comercial seleccionado, Stock Code corresponde a la referencia del producto en dicho proveedor y, Manufacturer, el fabricante del componente.

Category	Quantity	References	Value	Unit Cost	Supplier	Stock Code	Manufacturer
Resistors	3	R1-R3	330 Ω	€0,01	Digi Key[53]	CFR-25JR-52-330R	YAGEO
Resistors	2	R_SCL,R_SDA	4,7 kΩ	€0,01	Digi Key[54]	CFR-25JR-52-4K7	YAGEO
Diodes	1	D1	LED-GREEN	€0,09	Digi Key[55]	WP7113GD	Kingbright
Diodes	1	D2	LED-RED	€0,09	Digi Key[56]	WP7113ID	Kingbright
Diodes	1	D3	LED-YELLOW	€0,10	Digi Key[57]	WP7113YD	Kingbright
Capacitors	2	C1,C3	100 nF	€0,11	Digi Key[58]	C315C104M5U5TA	KEMET
Capacitors	2	C2,C4	4.7 µF	€0,03	Digi Key[59]	GRM188R61E475KE11D	Murata Electronics
Displays	1	LCD1	LM016L	€1,19	AliExpress[60]	HD44780	HNX Electric Store
Sounders	1	LS1	SOUNDER	€0,30	Digi Key[61]	PS1240P02BT	TDK Corporation
Microcontroller	1	PICO1	RASPBERRY PI PICO	€3,43	Digi Key[62]	SC0915	Raspberry Pi
Sensor	1	TOF	TOF SENSOR	€3,74	Digi Key[63]	VL53L1X	STMicroelectronics
Sensor	1	SONAR1	ULTRASONIC SENSOR	€0,99	AliExpress[64]	HCSR04	HNX Electric Store

TABLA 9. BILLS OF MATERIALS

Del análisis del BOM se obtiene un coste directo de materiales de aproximadamente 10€ por unidad para una producción de 100 unidades. Esto corresponde exclusivamente a los componentes electrónicos del sistema, pero para calcular el coste real de fabricación es necesario añadir los costes industriales asociados al proceso productivo. El coste de la fabricación de la PCB según algunos fabricantes como JLCPCB [65] o PCBasics [66] rondaría los 250€ las 100 unidades, es decir 2,5€ la unidad. No obstante, este importe depende del alcance del servicio que se contrate.

Además, para estimar el coste real del producto terminado habría que incluir otras tareas asociadas al proceso productivo como el ensamblaje, la calibración, el packaging, la logística y un margen destinado a incidencias o errores en la producción. Considerando estos factores, el coste total estimado en cuanto a la fabricación, incluyendo el BOM, fabricación de PCB y el resto de tareas, estaría entorno a los 20€ la unidad.

A partir de este valor, habría que aplicar un factor multiplicador orientativo de entre 2 y 3 para cubrir costes indirectos (desarrollo, soporte, garantía, etc.), así como el margen empresarial. De esta forma, el precio objetivo de venta podría situarse en un rango aproximado de 40-60 € por unidad. Esta estimación servirá como base para el posterior plan de marketing, permitiendo definir una estrategia de precios realista.

8. PLAN DE MARKETING

8.1. Propuesta de valor

El proyecto desarrollado se basa en un sistema electrónico orientado a mejorar la seguridad y la interacción en entornos educativos, industriales y logísticos mediante la detección de la proximidad de objetos en tiempo real. La solución responde a la necesidad de disponer de dispositivos accesibles, de bajo coste y fácil integración que permitan alertar al usuario de la presencia de obstáculos u objetos, reduciendo la probabilidad de incidentes en zonas de riesgo derivados de errores humanos o tecnológicos.

El sistema combina dos tecnologías: un sensor ToF con buena precisión en el corto alcance y un sensor ultrasónico para rangos superiores. La información capturada se transforma en avisos visuales mediante LED, alertas acústicas progresivas y visualización de la distancia y el estado, facilitando una interpretación inmediata para poder actuar de manera inmediata.

La propuesta se dirige principalmente a centros educativos (formación profesional, universidades y laboratorios docentes) y a instalaciones industriales de pequeñas empresas que requieran soluciones sencillas para apoyar en la seguridad en puestos de trabajo.

Frente a alternativas industriales de mayor coste, la solución desarrollada aporta una combinación equilibrada entre prestaciones técnicas, simplicidad de uso, escalabilidad y viabilidad económica, pudiendo evolucionar hacia versiones con conectividad, registro avanzado de eventos o integración en grandes sistemas industriales. Por ello, el dispositivo no solo se plantea como un sistema final, sino como una base tecnológica susceptible de convertirse en un producto comercial adaptable a distintos escenarios.

8.2. Segmentación y cliente objetivo

Para tener un buen enfoque de la viabilidad comercial del producto, es necesario identificar aquellos segmentos de mercado en los que la propuesta de valor presenta un mayor encaje. Dado el carácter técnico-didáctico del sistema, se han definido dos segmentos prioritarios: el ámbito educativo y el entorno industrial a pequeña escala.

8.2.1. Centros educativos y de formación

Este segmento incluye centros de formación profesional, universidades y laboratorios donde se impartan contenidos relacionados con la electrónica, la automatización, la robótica o la prevención de riesgos laborales.

Para estos entornos, el dispositivo puede utilizarse como herramienta práctica para demostrar conceptos de sensores, ejecución de software, integración hardware-software, sistemas embebidos y diseño de sistemas de seguridad. Asimismo, permite desarrollar prácticas reales, incrementando el valor formativo frente a montajes puramente teóricos o simulados.

El perfil de cliente dentro de este segmento corresponde principalmente a profesorado, responsables de laboratorio y departamentos académicos, que valoran soluciones económicas y fácilmente replicables.

8.2.2. Pequeñas empresas e instalaciones industriales

El segundo segmento objetivo está formado por las pequeñas empresas, talleres, almacenes o instalaciones industriales que requieran de soluciones simples para reforzar la seguridad en determinadas operaciones o puestos de trabajo.

En este caso, el sistema puede emplearse como apoyo a maniobras de aproximación, señalización de zonas de riesgo, control de distancias o mejora de la percepción del operario en tareas repetitivas. Su principal atractivo reside en ofrecer una alternativa de bajo coste y fácil implantación frente a sistemas industriales más complejos o de mayor inversión inicial.

El cliente tipo en este segmento sería el responsable de los talleres o almacenes, el gerente de la PYME (pequeña y mediana empresa), técnicos de prevención o encargados de producción, con necesidades puntuales de mejoras de seguridad sin acometer grandes proyectos de automatización.

8.3. Análisis de mercado y competencia

El mercado actual de soluciones cercanas a este proyecto presenta una amplia variedad de tecnologías y enfoques, especialmente en los entornos industriales donde la seguridad constituye uno de los factores más críticos. En los últimos años se ha incrementado la demanda de sistemas capaces de reducir riesgos derivados de maniobras, circulación interna de vehículos, interacción operario-máquina o presencia de zonas peligrosas.

Actualmente, las soluciones existentes se concentran principalmente en sistemas avanzados de sensorización, localización y señalización, desarrollados por fabricantes especializados en automatización y seguridad industrial. Estos productos ofrecen elevadas prestaciones, aunque habitualmente requieren una mayor inversión económica, integración e infraestructura complementaria.

8.3.1. Benchmark

Con el fin de contextualizar el dispositivo propuesto dentro del mercado actual, se va a realizar un benchmark de soluciones reales orientadas a la detección de proximidad y la prevención de colisiones en entornos industriales. Este análisis se centra en productos disponibles comercialmente que ofrecen funcionalidades similares, evaluando aspectos como la tecnología empleada, el tipo de detección, el alcance del sistema o su aplicación en entornos industriales. El mercado de sistemas de detección y alerta cuenta con algunos proveedores que ofrecen este tipo de sistemas. Algunas de las más destacadas son:

- [68] Divetis: Ofrece dispositivos que generan LED proyectadas en el suelo y que se ajustan a las necesidades de cada industria. Lo complementan con advertencias de peligros y proporcionan señales de gestión del tráfico.
- [69] ZoneSafe: Asegura las zonas de trabajo en entornos industriales en base a tres puntos críticos. Vehículo-persona con la detección de 360º alrededor del vehículo, vehículo-vehículo accionando alerta en varios niveles y vehículo-infraestructura activando avisos visuales inteligentes cuando se aproximan peligros.

- [70] Sirtronic: Cuenta con un sistema de advertencia de proximidad para peatones en las que los trabajadores portan etiquetas RFID que será detectada por los vehículos por lo que si un peatón se encuentra a una distancia menor a 3 metros, el conductor del vehículo será advertido con una luz y una alarma.
- [71] RealTrac: cuenta con un sistema de elusión de colisiones con dos tipos de monitorización: detección de proximidad vehículo-vehículo y vehículo-humano y en ambas cuenta con tres zonas de control (alerta, peligrosa y emergencia) permitiendo detectar cualquier caso de acercamiento arriesgado.
- [72] SICK: empresa especializada en el desarrollo de sensores y soluciones de automatización industrial. Sus sistemas, basados en sensores inteligentes, se utilizan para el control de procesos, la seguridad de las instalaciones y la prevención de accidentes en entornos industriales.
- [73] Banner engineering: desarrolla soluciones de medición y detección orientadas al control e inspección de procesos industriales. Sus sistemas utilizan diferentes tecnologías de sensorización que permiten detectar objetos con alta fiabilidad, realizar mediciones precisas y supervisar procesos de forma remota. Además, la empresa ofrece dispositivos de señalización y advertencia visual que permiten alertar a los operarios sobre posibles situaciones de riesgo en el entorno de trabajo.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con las características de las empresas y sus soluciones:

Empresa	**Tipo de tecnología**	**Aplicación principal**	**Tipo de alerta**	**Características destacadas**
Divetis	Señalización LED	Gestión de tráfico interno	Visual	Proyección de señales luminosas en el suelo
ZoneSafe	Sensores de proximidad	Seguridad de proximidad en entornos industriales	Visual y sonora	Detección 360º y zonas de seguridad configurables
Sirtronic	Sensores RFID	Prevención colisión máquina-operario	Visual y sonora	Uso de etiquetas RFID para trabajadores
RealTrac	Sistemas de localización en tiempo real	Control de proximidad	Visual y sonora	Monitorización vehículo-vehículo y vehículo-persona con diferentes niveles de alerta
SICK	Sensores industriales y sistemas de seguridad	Automatización industrial y protección de operarios	Visual y sonora	Sensores inteligentes para control de procesos y prevención de accidentes

Banner Engineering	Sensores industriales, y sistemas de medición	Detección de objetos y supervisión de procesos	Visual y sonora	Amplia gama de sensores y sistemas de señalización

TABLA 10. CARACTERÍSTICAS EMPRESAS

Como se puede observar, la mayoría de las soluciones comerciales están basadas en tecnologías RFID, sistemas de localización en tiempo real o sensores industriales especializados. Estas soluciones suelen estar orientadas a aplicaciones industriales que implican costes elevados o infraestructura compleja. Por ello, el sistema propuesto en este trabajo plantea una alternativa basada en sensores de distancia de bajo coste que permite implementar funciones básicas de alerta de proximidad de forma sencilla y accesible.

8.3.2. Oportunidad detectada

A pesar de la amplia oferta existente, se identifica un espacio de mercado en soluciones intermedias que combinen funcionalidad, sencillez en la implementación y coste reducido. Este nicho resulta especialmente relevante para los segmentos analizados anteriormente, donde las soluciones industriales tradicionales resultan sobredimensionadas o económicamente poco viables.

Por ello, el sistema desarrollado plantea una alternativa basada en sensores de distancia de bajo coste y arquitectura simplificada, capaz de ofrecer funciones básicas de alerta de proximidad mediante señalización visual y acústica.

8.3.3. Análisis DAFO

En la siguiente tabla, se muestra el análisis DAFO, una de las herramientas de análisis de mercado más utilizadas para evaluar la situación interna y externa de un proyecto:

Fortalezas	**Debilidades**
- Bajo coste frente a soluciones industriales - Fusión de sensores complementarios - Fácil instalación y uso - Aplicable tanto en educación como en industria	- Producto sin marca consolidada - Prestaciones inferiores frente a otros sistemas - Sin certificación industrial inicial - Producción limitada en fase inicial
Oportunidades	**Amenazas**
- Crecimiento de la digitalización industrial - Mayor interés por la seguridad laboral - Expansión de la formación técnica - Posibilidad de nuevas versiones	- Competidores consolidados - Entrada de productos low-cost importados - Cambios normativos y certificaciones exigentes - Rápida evolución tecnológica

TABLA 11. ANÁLISIS DAFO

Este análisis muestra que la principal ventaja competitiva del proyecto reside en su posicionamiento como solución accesible y funcional para segmentos donde las alternativas existentes presentan barreras económicas y técnicas superiores

8.4. G2M (Go-to-market)

[74] Una vez definida la propuesta de valor y analizado el mercado objetivo, es necesario establecer la estrategia de entrada al mercado, entendida como el conjunto de acciones destinadas a introducir el producto de forma progresiva, captar los primeros clientes y validar su aceptación.

Dado el carácter técnico del sistema desarrollado, así como su aplicación en entornos concretos y especializados, se plantea una estrategia de entrada gradual, priorizando aquellos segmentos donde el valor aportado sea más evidente y la barrera de adopción del producto sea menor.

8.4.1. Entrada en el sector educativo

Como primera fase de comercialización, se orienta la entrada en el ámbito educativo. Este segmento presenta varias ventajas estratégicas:

- Mayor afinidad con proyectos tecnológicos desarrollados en entornos académicos
- Procesos de adopción más accesibles
- Necesidad de equipamiento práctico y real
- Posibilidad de uso tanto docente como experimental
- Capacidad de generar visibilidad y referentes iniciales

En esta fase, el producto se comercializaría en formato kit educativo, acompañado de documentación técnica, ejemplos de uso y material de apoyo.

8.4.2. Expansión hacia el sector industrial

Una vez validado el producto en aplicaciones educativas y obtenidas las primeras referencias de uso, la estrategia contempla una segunda fase orientada a pequeñas empresas, talleres e instalaciones industriales pequeñas.

En este mercado, la propuesta se centra en ofrecer una solución sencilla para reforzar la seguridad en operaciones básicas, maniobras de aproximación o señalización de zonas de riesgo, sin necesidad de implantar sistemas complejos de automatización.

Para esta etapa, podrían desarrollarse versiones con mayor robustez mecánica, protección ambiental e integración con otros equipos industriales.

8.4.3. Canales de comercialización

Los canales de venta propuestos son los siguientes:

- Venta directa B2B a centros educativos y pequeñas empresas
- Colaboraciones con distribuidores técnicos especializados en electrónica y automatización
- Presencia online mediante página web propia y plataformas de comercio electrónico
- Ferias y jornadas sectoriales, orientadas a demostraciones y captación de contactos.

La combinación de canales directos y digitales permite reducir costes comerciales en fases tempranas y obtener feedback directo del mercado.

8.4.4. Acciones iniciales de lanzamiento

Para facilitar la introducción del producto en el mercado, se proponen las siguientes acciones iniciales:

- Desarrollo de prototipos demostrativos funcionales
- Realización de pruebas piloto en entornos educativos
- Elaboración de vídeos demostrativos
- Contacto directo con los centros de venta, tanto educativos como industriales
- Recogida de feedback para futuras iteraciones del producto

El objetivo principal de esta estrategia G2M no es únicamente la venta inicial del producto, sino su validación técnica, la generación de confianza en los primeros usuarios y la creación de una base sólida para futuras fases de crecimiento.

8.5. Modelo de ingresos

EL modelo de ingresos del sistema se basa principalmente en la venta directa del dispositivo en formato de producto terminado o kit adaptado al cliente. Al tratarse de una solución física basada en hardware, la fuente principal de ingresos inicial proviene de la comercialización unitaria de cada uno de los equipos.

8.5.1. Venta del producto

La modalidad propuesta es la venta única del producto en diferentes versiones: la versión educativa, para centros formativos, la versión industrial, destinada a pequeñas empresas y una posible versión industrial superior, enfocada a aplicaciones con mayores requisitos de robustez o integración.

Además de esta venta directa, se puede incorporar otras líneas adicionales de ingresos como los servicios de instalación, la formación técnica, la personalización del producto y el mantenimiento.

8.5.2. Relación con el coste del producto

Del análisis económico realizado en el apartado del Bills of Materials (BOM) se obtiene un coste total estimado de fabricación cercano a 20€ la unidad, considerando materiales, fabricación de PCB, ensamblaje, packaging y otros costes.

Tomando como referencia dicho valor, el precio de venta se puede situar en un rango aproximado de 40 a 60€ por unidad, siendo las unidades más baratas aquellas versiones educativas que sean más simples y las más caras aquellas versiones industriales que exigen algo más de trabajo.

8.5.3. Evolución futura

En fases posteriores podrían desarrollarse versiones conectadas o servicios avanzados con ingresos recurrentes, como monitorización remota, conexión a otros sistemas de seguridad o mantenimiento predictivo.

En conjunto, el modelo de ingresos combina una base inicial realista que se sustenta en la venta del hardware y que tiene una elevada capacidad de crecimiento hasta soluciones mucho más complejas y con un mayor valor añadido.

8.6. Marketing Mix (4P)

En este apartado se aplica la metodología de las 4P, explicadas en el estado del arte, adaptando las variables de producto, precio, distribución y promoción a las características específicas del sistema.

8.6.1. Producto

El producto desarrollado consiste en un sistema electrónico basado en la detección de proximidad mediante la combinación de sensores ToF y ultrasónico, capaz de generar alertas visuales y acústicas en tiempo real.

Este producto, además, plantea distintas versiones para adaptarse a diferentes segmentos del mercado, la diferencia entre las versiones se indican en la Tabla 12. Diferenciación entre versiones

Característica	Educativa	Industrial	Industrial Avanzada
Entorno	FP, universidades, laboratorio	PYMES, talleres	Industria con mayor exigencia
Protección	Básico o sin carcasa	Carcasa	Mayor IP
Funciones	Alerta básica	Seguridad amplia	Integración
Conectividad	No necesaria	Opcional	Integrable
Cableado	Simple	Conectores eficientes	Borneras industriales
Precio	Bajo	Medio	Superior
Mantenimiento	Manual	Revisión periódica	Predictivo

TABLA 12. DIFERENCIACIÓN ENTRE VERSIONES

Conviene señalar que el sistema diseñado, implementado y validado a lo largo de todo el proyecto corresponde a la versión educativa, concebida como producto base. Las versiones industriales planteadas durante este capítulo representan posibles evoluciones futuras orientadas a otros segmentos de mercado, incorporando mejoras en robustez, integración y adaptación al entorno.

8.6.2. Precio

La estrategia de precios se basa en una política de penetración en el mercado, ofreciendo una solución accesible frente a alternativas industriales de coste elevado. Tomando como referencia el análisis económico realizado previamente, se considera el siguiente rango de precios:

- Versión educativa: 40-45€
- Versión industrial: 45-55€
- Versión industrial avanzada: 55-60€ o superior

Estos precios permiten mantener competitividad en segmentos sensibles al coste y, al mismo tiempo, asegurar márgenes suficientes para la sostenibilidad del proyecto.

8.6.3. Plaza

La estrategia de distribución del producto se plantea mediante canales de comercialización directos, priorizando aquellos que permitan un contacto cercano con el cliente final durante la fase de implementación.

En la etapa inicial, la venta se orienta a través de canales B2B, lo que permite comprender mejor las necesidades reales de los usuarios y obtener una retroalimentación temprana. Además, se contempla la colaboración con distribuidores especializados en electrónica y automática, capaces de ampliar el alcance comercial.

Una vez obtenida una versión bastante estandarizada, se considera adecuada la comercialización mediante canales digitales, como páginas web y plataformas de comercio electrónico. A medio-largo plazo la estrategia podría ampliarse mediante acuerdos con empresas de servicios que incorporen el sistema dentro de soluciones más completas.

8.6.4. Promoción

La promoción inicial se orienta a generar confianza y visibilidad en segmentos técnicos específicos, priorizando acciones demostrativas frente a campañas publicitarias, por lo que se proponen diferentes acciones:

- Demostraciones funcionales
- Videos técnicos mostrando el funcionamiento del sistema
- Difusión de resultados
- Presencia en redes sociales
- Contacto directo con potenciales clientes
- Elaboración de documentación técnica y fichas de producto

Este enfoque promocional permite optimizar los recursos y obtener una mayor credibilidad del producto en las primeras fases.

8.7. Posicionamiento

[75] El posicionamiento define el lugar que se pretende ocupar en la mente del cliente respecto a las alternativas existentes en el mercado. Para el sistema desarrollado, la estrategia no se basa en competir directamente con soluciones de alta gama, sino en situarse como una alternativa más accesible y funcional en segmentos donde las opciones actuales son excesivamente complejas.

Las soluciones líderes del mercado, analizadas en el benchmark y ofrecidas por fabricantes especializados, destacan por su gran precisión y capacidad de integración en entornos industriales. Sin embargo, estas prestaciones suelen ir asociadas a un mayor coste tanto de adquisición como de instalación y mantenimiento lo que limita su adopción en centros educativos o en pequeñas empresas.

Por ello, el producto propuesto se posiciona como una alternativa para estos entornos que requieren funciones reales de alerta de proximidad sin necesidad de infraestructuras complejas ni inversiones elevadas. Así la diferenciación del producto reside en:

- El uso combinado de tecnologías de sensores complementarias
- Señalización visual y acústica inmediata
- Bajo coste de implementación
- Facilidad en la instalación y el uso
- Posibilidad de evolución a versiones más avanzadas

En conclusión, el sistema busca un nicho específico basado en la relación coste-utilidad, ofreciendo una solución realista para usuarios que no requieren de sistemas industriales complejos.

8.8. Escalabilidad

[76] La escalabilidad del proyecto hace referencia a la capacidad del sistema para crecer y evolucionar de forma sostenible tanto a nivel productivo como comercial y tecnológico. En este proyecto, se plantea una expansión progresiva sin necesidad de modificar la base del producto.

8.8.1. Escalabilidad productiva

Desde el punto de vista de la producción, el sistema presenta una arquitectura adecuada para su fabricación en pequeñas y medianas series. La utilización de componentes ampliamente disponibles en el mercado, junto con la posibilidad de externalizar otros procesos como la fabricación de la PCB o el ensamblaje, facilitan el aumento del volumen de producción en función de la demanda.

En una fase inicial, la fabricación puede abordarse mediante lotes reducidos orientados a la validación comercial y a los primeros clientes. Posteriormente, una mayor estandarización del diseño permitiría optimizar costes unitarios, reducir tiempos de montaje y mejorar la eficiencia.

8.8.2. Escalabilidad comercial

A nivel comercial, el producto parte de segmentos concretos como centros educativos y pequeñas empresas, donde la propuesta de valor presenta un encaje claro. No obstante, una vez validada su aceptación inicial, el mercado potencial puede ampliarse hacia nuevos ámbitos. Entre algunas posibles extensiones destacan:

- Centros tecnológicos y laboratorios de innovación
- Empresas logísticas y almacenes
- Instalaciones con necesidad de señalización y seguridad
- Mercados internacionales

Esta capacidad de expansión permite diversificar clientes y reducir la dependencia en un único segmento.

8.8.3. Evolución futura del producto

La base tecnológica desarrollada también permite incorporar mejoras funcionales y nuevas versiones del sistema sin alterar su concepto principal. Entre las líneas de evolución más relevantes se consideran.

- Incorporación de conectividad inalámbrica
- Registro de eventos y análisis de datos

- Integración IoT
- Nuevas tecnologías de sensores complementarias
- Mejora en la protección ambiental
- Desarrollo de interfaces de supervisión remota
- Adaptación a nuevos casos de uso

Estas líneas descritas representan algunas de las vías de desarrollo más relevantes identificadas en la actualidad, sin descartar la aparición de nuevas oportunidades de mejora y adaptación conforme evolucionen las necesidades del mercado y la tecnología disponible.

9. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

El sistema desarrollado en este TFM cuenta con diferentes criterios de sostenibilidad orientados a favorecer soluciones tecnológicas aplicables a un entorno real y que se alinean con algunos de los principios recogido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Organización de las Naciones Unidas [77].

Desde el punto de vista ambiental, el proyecto se orienta hacia el desarrollo de un sistema electrónico de bajo consumo y de pequeño tamaño, basado en componentes ampliamente utilizados y con una gran disponibilidad comercial. El uso de una arquitectura embebida mediante una RPi con microcontrolador RP2040 permite contar con una solución de un consumo energético más reducido que otros sistemas industriales más complejos basados en ordenadores industriales o plataformas de procesamiento de gran potencia.

Además, el diseño de la PCB se ha realizado buscando una arquitectura compacta que favorece tanto la reducción del material empleado como los futuros mantenimientos y sustituciones de componentes. También, el uso de la simulación desde Proteus y el diseño en Altium Designer permiten detectar errores antes de la fabricación física, reduciendo desperdicios asociados a prototipos y optimizando el proceso de desarrollo.

Desde el punto de vista social, el proyecto contribuye con la mejora de la seguridad en entornos industriales, logísticos y educativos mediante la detección temprana de obstáculos y situaciones potencialmente peligrosas. La implementación de alertas visuales y acústicas facilita una respuesta rápida por parte del usuario y contribuye a la reducción de riesgos debidos a la interacción máquina-operario. En este sentido, el sistema se alinea con el ODS 3 “Salud y bienestar”, al promover entornos de trabajo más seguros, al ODS 4, “Educación de calidad”, debido a su potencial aplicación en contextos formativos y tecnológicos, y con el ODS 8 “Trabajo decente y crecimiento económico”, al apoyar la mejora de las condiciones de seguridad laboral [78].

Por otro lado, desde el punto de vista económico, el proyecto plantea una solución de bajo coste y que puede ser escalable frente a otros sistemas industriales más complejos y costosos. Esto favorece su posible implantación en pequeñas empresas, centros educativos o entornos con recursos limitados, facilitando el acceso a tecnologías de asistencia y seguridad que, en muchos casos, presentan barreras económicas.

En relación con los ODS, el trabajo presenta vinculación tanto con los ODS mencionados anteriormente como con el ODS 9, “Industria, innovación e infraestructura”, debido al desarrollo de una solución tecnológica basada en innovación electrónica aplicada a la seguridad, y con el ODS 12, “Producción y consumo responsables”, mediante el uso racional de recursos y la reducción de iteraciones físicas innecesarios gracias a la simulación previa.

Como posibles estrategias futuras, se podrían incorporar medidas orientadas a la reducción del consumo energético, mediante modos de bajo consumo, el empleo de materiales reciclables, la optimización del tamaño de la PCB o la integración de sistemas de monitorización remota que permitan un mantenimiento predictivo más eficiente. Además, la adaptación del dispositivo a más escenarios industriales o educativos podría aumentar su impacto social y favorecer una implantación más amplia de soluciones tecnológicas de seguridad accesibles.

10.CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster ha permitido diseñar y validar un sistema electrónico orientado a mejorar la seguridad mediante la detección de obstáculos en tiempo real. El proyecto ha demostrado que es posible implementar una solución funcional, de bajo coste y técnicamente viable.

Uno de los principales logros del trabajo ha sido la integración de las dos tecnologías de sensores complementarias, combinando un sensor ToF VL53L1X y un sensor ultrasónico HC-SR04. Esta arquitectura híbrida ha permitido cubrir distintos rangos de distancia, compensando las limitaciones individuales de cada sensor y proporcionando una respuesta más eficaz ante diferentes escenarios de uso.

Asimismo, se ha desarrollado una lógica de control basada en zonas de proximidad, acompañada de una interfaz multimodal compuesta por señalización visual, aviso acústico y visualización en pantalla. Esta combinación facilita una interpretación rápida e intuitiva del estado del sistema, mejorando la interacción con el usuario y reforzando la utilidad práctica del dispositivo.

Desde el punto de vista técnico, el trabajo ha abordado el ciclo completo de desarrollo de producto: análisis inicial, selección de componentes, diseño esquemático, programación, simulación, diseño de PCB y validación previa a fabricación. El uso de herramientas como Proteus y Altium Designer ha permitido trasladar el concepto inicial a un diseño con criterios profesionales y fabricables.

Además, el análisis de viabilidad comercial realizado muestra que la propuesta presenta potencial de aplicación en entornos educativos, industriales y logísticos donde se demanden soluciones sencillas, económicas y escalables. En conjunto, el proyecto cumple los objetivos planteados y constituye una base sólida para futuras evoluciones tanto técnicas como comerciales.

Como continuación natural del proyecto, se planean diversas líneas de mejora y ampliación que permitirían aumentar las prestaciones del sistema y acercarlo a una posible implantación real:

1. **Fabricación y validación experimental del prototipo:** Realizar el ensamblaje de la PCB diseñada y efectuar ensayos en condiciones reales para contrastar el comportamiento obtenido en simulación.
2. **Mejora de algoritmos de fusión de sensores:** Desarrollar estrategias más avanzadas para la combinación de medidas entre sensores, incorporando filtrados adaptativos o técnicas de decisión inteligentes.
3. **Incorporación de conectividad:** Añadir comunicaciones inalámbricas mediante Wi-Fi o Bluetooth para monitorización remota, configuración del sistema o integración con plataformas IoT.
4. **Registro y análisis de datos:** Implementar almacenamiento histórico de eventos, distancias detectadas o incidencias, facilitando tareas de mantenimiento preventivo y análisis operativo.
5. **Ampliación de interfaces de usuario:** Sustituir o complementar la pantalla LCD por interfaces gráficas más avanzadas o aplicaciones móviles.

6. **Adaptación a nuevos escenarios de uso:** Estudiar su aplicación en vehículos autónomos, asistencia al aparcamiento, robótica móvil, almacenes inteligentes o sistemas avanzados de seguridad industrial.
7. **Industrialización del producto:** Optimizar diseño, costes, certificaciones y procesos de fabricación para evolucionar desde un prototipo académico hacia un producto comercializable.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Mecalux, «Almacenes industriales y su gestión». Accedido: 4 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mecalux.es/blog/almacenes-industriales
[2] «9717001101_UA1_T_03_rev».
[3] «UNE-EN ISO 13849-1:2016 Seguridad de las máquinas. Partes de l...» Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057029
[4] «UNE-EN 61508-1:2011 Seguridad funcional de los sistemas eléctr...» Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0047022
[5] «(22) El Origen de los Almacenes | LinkedIn». Accedido: 6 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.linkedin.com/pulse/el-origen-de-los-almacenes-mercadologistico/
[6] mjgutierrez, «Evolución del almacenamiento: De instalaciones tradicionales a sistemas inteligentes | Noatum Logistics», Global. Accedido: 6 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.noatumlogistics.com/es/evolucion-del-almacenamiento-de-instalaciones-tradicionales-a-sistemas-inteligentes/
[7] M. S. Galindez, «Historia del almacén: ¡viaja al pasado de la logística!», Campus Training. Accedido: 4 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.campustraining.es/noticias/historia-almacen/
[8] «Riesgos laborales en un almacén y cómo prevenirlos | Grupo GDH YALE®». Accedido: 7 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://grupogdh.com/blog/riesgos-laborales-en-un-almacen-y-como-prevenirlos/
[9] «Principales riesgos laborales en los almacenes». Accedido: 7 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ractem.es/blog/principales-riesgos-laborales-los-almacenes
[10] Mecalux, «Máquinas de almacén: ¿cuál necesito para cada operativa?» Accedido: 7 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mecalux.es/blog/maquinas-de-almacen
[11] «Tipos y aplicaciones de sensores de proximidad: la guía definitiva». Accedido: 8 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.geya.net/es/different-types-of-proximity-sensors/
[12] lila, «¿Qué sensores de distancia son los mejores para evitar obstáculos con robots? - Meskernel». Accedido: 8 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://meskernel.net/es/sensor-de-distancia-2/
[13] alldatasheet.com, «VL53L1X PDF». Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131878/STMICROELECTRONICS/VL53L1X.html
[14] alldatasheet.es, «HC-SR04 PDF». Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1132203/ETC2/HC-SR04.html
[15] «¿Qué es y cómo funciona un microcontrolador? | Blog UE», Universidad Europea. Accedido: 8 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://universidadeuropea.com/blog/que-es-microcontrolador/
[16] «(3) Microcontroladores. ¿Qué son? y su importancia en la industria. | LinkedIn». Accedido: 8 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.linkedin.com/pulse/microcontroladores-qu%C3%A9-son-y-su-importancia-en-la-industria-/
[17] «Historia del microcontrolador - Exposición - PANASYS». Accedido: 9 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.panasyslcd.com/info/microcontroller-history-36075424.html

[18] «Las 10 mejores placas de desarrollo de microcontroladores para comprar». Accedido: 8 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.wonderfulpcb.com/es/blog/top-10-microcontroller-development-boards-to-buy-2025/
[19] Y. Fernández, «Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno», Xataka. Accedido: 9 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno
[20] L. Llamas, «Raspberry Pi Pico, la placa de desarrollo de Raspberry», Luis Llamas. Accedido: 9 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/raspberry-pi-pico-la-placa-de-desarrollo-de-raspberry/
[21] S. Carranza, «CONOCIENDO AL ESP32», TodoMaker. Accedido: 9 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://todomaker.com/blog/conociendo-al-esp32/
[22] W. Unterschuetz, «¿Por qué STM32? Introducción a Riverdi STM32 Embedded Displays», Riverdi. Accedido: 9 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://riverdi.com/es/blog/por-que-stm32-introduccion-a-riverdi-stm32-embedded-displays
[23] «Microcontrolador PIC: arquitectura, características y aplicaciones». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.pcbasic.com/es/blog/pic_microcontroller.html
[24] «Automatización de diseño electrónico (EDA) | Siemens Software», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/electronic-design-automation-eda/
[25] «¿Qué es la automatización del diseño electrónico y por qué es importante en 2026?» Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.wonderfulpcb.com/es/blog/electronic-design-automation-significance-ai-cloud/
[26] «¿Qué es la automatización de diseño electrónico (EDA)? | Pure Storage». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.purestorage.com/la/knowledge/what-is-eda.html
[27] «¿Qué es proteus?» Accedido: 16 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/2-proteus.html
[28] «Altium Designer: the engine powering Altium Develop and Altium Agile». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.altium.com/altium-designer
[29] «Por qué Altium Designer puede ayudar a diseñar PCBs de manera intuitiva e inteligente», Altium. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://resources.altium.com/es/p/why-altium-designer-can-help-design-pcbs-intuitively-and-intelligently
[30] «EasyEDA – Simulador de circuitos y diseño de circuitos impresos online». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://easyeda.com/es
[31] «¿Qué es NI Multisim™? Software de simulador de circuitos». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ni.com/es/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html
[32] «DipTrace - Schematic and PCB Design Software». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://diptrace.com/es/
[33] «Free PCB Design Software | CircuitMaker». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://circuitmaker.com/
[34] «Free PCB Design Software | Online PCB Designer | DesignSpark». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.rs-online.com/designspark/pcb-software

[35] «¿Qué es el Marketing? El elemento indispensable para tu empresa.» Accedido: 15 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.enae.es/blog/el-marketing-un-elemento-indispensable
[36] «Marketing Mix - ¿Qué es el marketing mix? | SumUp Facturas», SumUp - Una forma más inteligente de cobrar. Accedido: 15 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sumup.com/es-es/facturas/glosario/marketing-mix/
[37] BBVA, «BBVA ESPAÑA». Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.bbva.es/finanzas-vistazo/ae/cuentas/segmentacion-de-mercado.html
[38] «Marketing B2B: qué es y principales estrategias», Guía profesional de Indeed. Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://es.indeed.com/orientacion-laboral/buscar-trabajo/b2b-marketing-que-es
[39] «Qué es un benchmark». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.tableau.com/es-es/learn/articles/what-is-a-benchmark
[40] administrador, «Análisis DAFO en la estrategia de marketing de la empresa». Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.mba-madrid.com/marketing/analisis-dafo-estrategia-marketing/
[41] P. Galiana, «Qué es una estrategia Go To Market (G2M)», *Think. Innov.*, abr. 2021, Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.iebschool.com/hub/que-es-estrategia-go-to-market-comercio-ventas/
[42] «Studypool Homework Help - Importar modelos de pspice a proteus». Accedido: 22 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.studypool.com/documents/1724947/importar-modelos-de-pspice-a-proteus
[43] syedzainnasir, «Ultrasonic Sensor Library for Proteus - The Engineering Projects». Accedido: 23 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.theengineeringprojects.com/2015/02/ultrasonic-sensor-library-proteus.html
[44] paguayo, «¿Cómo funciona el sensor ultrasónico HC-SR04 y cómo se conecta con Arduino?», MCI Educación. Accedido: 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://cursos.mcielectronics.cl/2022/12/06/como-funciona-el-sensor-ultrasonico-hc-sr04-y-como-se-conecta-con-arduino/
[45] syedzainnasir, «Raspberry Pi Pico Library for Proteus - The Engineering Projects». Accedido: 22 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.theengineeringprojects.com/2023/08/raspberry-pi-pico-library-for-proteus.html
[46] L. Llamas, «Implementar un filtro de media móvil rápido en Arduino», Luis Llamas. Accedido: 14 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/arduino-filtro-media-movil/
[47] L. Llamas, «Filtro paso bajo y paso alto exponencial (EMA) en Arduino», Luis Llamas. Accedido: 14 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/arduino-paso-bajo-exponencial/
[48] «Diseño de Planos de Masa (Ground Planes) Efectivos en PCBs», TR3BOL ARGENTINA. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://trebolargentina.com/diseno-de-planos-de-masa-ground-planes-efectivos-en-pcbs/
[49] «Explore SnapMagic Search's Symbol & Footprint Libraries | SnapMagic Search». Accedido: 11 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.snapeda.com/home/
[50] «3D ContentCentral - Modelos CAD en 3D gratuitos, dibujos 2D y catálogos de proveedores». Accedido: 11 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.3dcontentcentral.es/

[51] «Embedded MCU, DSP Evaluation Boards | Development Boards, Kits, Programmers | DigiKey». Accedido: 11 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.com/en/products/filter/evaluation-boards/embedded-mcu-dsp-evaluation-boards/786?s=N4IgTCBcDaIHIEsAuAnA9gcwKYDsCcArAARYBuAhgDYCu5SCaORA1siALoC%20QA&dclid=CPLkrZL1jZIDFbMhBgAdDJUZlg&gad_source=7&gad_campaignid=23210054347

[52] «PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB». Accedido: 12 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://jlcpcb.com/

[53] «CFR-25JR-52-330R», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/yageo/CFR-25JR-52-330R/11962

[54] «CFR-25JR-52-4K7», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/yageo/CFR-25JR-52-4K7/11990

[55] «WP7113GD Kingbright | Optoelectrónica | DigiKey». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/kingbright/wp7113gd/1747662

[56] «WP7113ID», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/kingbright/WP7113ID/1747663

[57] «WP7113YD», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/kingbright/WP7113YD/1747683

[58] «C315C104M5U5TA», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/kemet/C315C104M5U5TA/817927

[59] «GRM188R61E475KE11D», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/murata-electronics/GRM188R61E475KE11D/3900465

[60] «LCD1602 + I2C 1602 16x2 1602A pantalla azul/verde HD44780 carácter LCD/w IIC/I2C módulo adaptador de interfaz serie para Arduino - AliExpress 502», aliexpress. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: //es.aliexpress.com/item/1005009446291306.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=&aff_short_key=

[61] «PS1240P02BT», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/tdk/PS1240P02BT/935924

[62] «SC0915», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/raspberry-pi/SC0915/13624793

[63] «VL53L1CXV0FY/1», DigiKey Electronics. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.digikey.es/es/products/detail/stmicroelectronics/VL53L1CXV0FY-1/8258055

[64] «1-10 uds/sensor ultrasónico HC-SR04 HCSR04 a Detector de ondas mundiales módulo de rango HC SR04 Sensor de distancia para Arduino 3,3 V-5V - AliExpress». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/1005007849944952.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.2874606flV08fJ&algo_pvid=2aa9b834-ffca-4ef7-a2f5-7bea57305944&algo_exp_id=2aa9b834-ffca-4ef7-a2f5-7bea57305944-0&pdp_ext_f=%7B%22order%22%3A%224448%22%2C%22eval%22%3A%221%22%2C%22fromPage%22%3A%22search%22%7D&pdp_npi=6%40dis%21EUR%211.47%210.99%21%21%211.65%211.10%21%402103890917738564527992599e5d8d%2112000042532579465%21sea%21ES%210%21ABX%211%210%21n_tag%3A-

29910%3Bd%3Ac2425a48%3Bm03_new_user%3A-29895%3BpisId%3A5000000197846862&curPageLogUid=Bi8xmvocgLj3&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A%7Cx_object_id%3A1005007849944952%7C_p_origin_prod%3A

[65] «Online PCB Instant Quote - JLCPCB». Accedido: 13 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://cart.jlcpcb.com/es/quote

[66] «Contact us via LiveChat!» Accedido: 13 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://secure.livechatinc.com/customer/action/open_chat?license_id=16484265&group=0&embedded=1&widget_version=3&unique_groups=0&organization_id=9212e363-271b-470a-9203-d9aa5dda4840&use_parent_storage=1&x-region=us-south1

[67] «Sistema de advertencia por proximidad industrial». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.divetis.es/sistemas-de-advertencia-por-proximidad-en-que-consisten/

[68] «Proyectores LED para señalización luminosa de seguridad». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.divetis.es/seguridad-inteligente-industrial/proyectores-luz-led-senales-paso-peatones-stop-linea-guia/

[69] «ZoneSafe - Alerta de proximidad y seguridad en el lugar de trabajo», Zonesafe. Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://zonesafe.com/es/

[70] «Sistemas de advertencia de proximidad», Sirtronic. Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://sirtronic.es/sistemas-de-advertencia-de-proximidad/

[71] «REALTRAC CAS — Sistema de evitación de colisiones para protección de personal | Seguridad industrial». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://real-trac.com/es/system/realtrac-cas/

[72] «Acerca de SICK | SICK». Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sick.com/es/es/acerca-de-sick/w/about-sick

[73] «Quiénes Somos», Banner Engineering. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.bannerengineering.com/mx/es/company/who-we-are.html

[74] «Qué es go to market: Definición, ejemplos y beneficios | ESIC». Accedido: 16 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.esic.edu/rethink/marketing-y-comunicacion/estrategia-go-to-market-que-es

[75] P.-N. Schwab, «Posicionamiento marketing: definición, retos, ejemplos [Guía 2025]», Market research consulting. Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.intotheminds.com/blog/es/posicionamiento-marketing/

[76] «Escalabilidad - Diccionario de marketing - Upnify». Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://upnify.com/es/diccionario-marketing/escalabilidad.html

[77] «Agenda 2030 de las Naciones Unidas | Pacto Mundial ONU», Pacto Mundial. Accedido: 12 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.pactomundial.org/noticia/agenda-2030-de-la-onu-hacia-donde-vamos/

[78] «ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible | Pacto Mundial ONU», Pacto Mundial. Accedido: 12 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/

ANEXO A. CÓDIGO DEL FIRMWARE

```
#include <LiquidCrystal.h>

// ---------------- LCD ----------------
LiquidCrystal lcd(9, 8, 7, 6, 5, 4);

// ---------------- MCP3004 (SPI bit-bang) ----------------
const int PIN_CS   = 16;
const int PIN_CLK  = 15;
const int PIN_MISO = 17;
const int PIN_MOSI = 18;

// ---------------- ULTRASONIDOS ----------------
const int TRIG_PIN = 14;
const int ECHO_PIN = 19;

// ---------------- SALIDAS ----------------
const int LED_ROJO     = 1;
const int LED_AMARILLO = 2;
const int LED_VERDE    = 3;
const int BUZZER_PIN   = 0;

// ---------------- CONSTANTES ----------------
const int TOF_MAX_CM = 120;
const int DIST_MAX_MAP = 200;
const long ULTRA_MAX_REAL = 1116;

const int UMBRAL_PELIGRO = 80;
const int UMBRAL_SAFE    = 150;

const int FREC_PELIGRO = 4000;
const int FREC_CAUTION = 1500;

// ============================================================
//  FILTRADO (Mediana N=5 + EMA)
//  - Se aplica por sensor: ToF y Ultrasonidos por separado
// ============================================================
const int N_MED = 5;
const float ALFA_EMA = 0.25f;

int bufferToF[N_MED] = {0};
int bufferUltra[N_MED] = {0};

int idxToF = 0, idxUltra = 0;
bool bufToFlleno = false, bufUltralleno = false;

float emaToF = 0.0f, emaUltra = 0.0f;
```

```
bool emaToF_init = false, emaUltra_init = false;

int median5(const int *v) {
  int a[N_MED];
  for (int i = 0; i < N_MED; i++) a[i] = v[i];

  // Ordenación simple (N=5)
  for (int i = 0; i < N_MED - 1; i++) {
    for (int j = i + 1; j < N_MED; j++) {
      if (a[j] < a[i]) {
        int t = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = t;
      }
    }
  }
  return a[2]; // elemento central (mediana)
}

float emaUpdate(float prev, float x) {
  return ALFA_EMA * x + (1.0f - ALFA_EMA) * prev;
}

// ---------- SPI FULL DUPLEX ----------
byte spiTransferByte(byte outByte) {
  byte inByte = 0;
  for (int i = 7; i >= 0; i--) {
    digitalWrite(PIN_MOSI, (outByte >> i) & 1);
    digitalWrite(PIN_CLK, HIGH);
    inByte <<= 1;
    if (digitalRead(PIN_MISO)) inByte |= 1;
    digitalWrite(PIN_CLK, LOW);
  }
  return inByte;
}

int readMCP3004(int channel) {
  digitalWrite(PIN_CS, LOW);
  spiTransferByte(0x01);
  byte b1 = spiTransferByte(0x80 | (channel << 4));
  byte b2 = spiTransferByte(0x00);
  digitalWrite(PIN_CS, HIGH);
  return ((b1 & 0x03) << 8) | b2;
}

// ---------- ToF (simulado por ADC) ----------
int leerToFcm() {
  int adc = readMCP3004(0);
  adc = constrain(adc, 0, 1023);
  return map(adc, 0, 1023, 0, TOF_MAX_CM);
```

```
}

// ToF filtrado (Mediana + EMA)
int leerToFcm_filtrado() {
  int d = leerToFcm();

  bufferToF[idxToF] = d;
  idxToF = (idxToF + 1) % N_MED;
  if (idxToF == 0) bufToFlleno = true;

  // Mientras no haya 5 muestras, devolver sin filtrar (arranque)
  if (!bufToFlleno) return d;

  int med = median5(bufferToF);

  if (!emaToF_init) { emaToF = med; emaToF_init = true; }
  else              { emaToF = emaUpdate(emaToF, med); }

  return (int)(emaToF + 0.5f);
}

// ---------- ULTRASONIDOS ----------
long leerUltrasonidosCm() {
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

  long duracion = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
  long distancia = duracion / 58;
  return constrain(distancia, 0, ULTRA_MAX_REAL);
}

int leerUltrasonidos_120a200() {
  long d = leerUltrasonidosCm();

  // 0–1116 → 0–200
  long d_0a200 = map(d, 0, ULTRA_MAX_REAL, 0, DIST_MAX_MAP);

  // forzar 120–200
  return constrain(
    map(d_0a200, 0, DIST_MAX_MAP, TOF_MAX_CM, DIST_MAX_MAP),
    TOF_MAX_CM,
    DIST_MAX_MAP
  );
}
```

```
// Ultrasonidos filtrados (Mediana + EMA)
int leerUltrasonidos_120a200_filtrado() {
  int d = leerUltrasonidos_120a200();

  bufferUltra[idxUltra] = d;
  idxUltra = (idxUltra + 1) % N_MED;
  if (idxUltra == 0) bufUltralleno = true;

  if (!bufUltralleno) return d;

  int med = median5(bufferUltra);

  if (!emaUltra_init) { emaUltra = med; emaUltra_init = true; }
  else                { emaUltra = emaUpdate(emaUltra, med); }

  return (int)(emaUltra + 0.5f);
}

// ---------- DISTANCIA FINAL ----------
int calcularDistanciaFinal() {
  // >>> CAMBIO: usar lecturas filtradas
  int dToF = leerToFcm_filtrado();

  if (dToF < TOF_MAX_CM) {
    return dToF; // 0–120
  } else {
    return leerUltrasonidos_120a200_filtrado(); // 120–200
  }
}

// ---------------- SETUP ----------------
void setup() {
  // SPI
  pinMode(PIN_CS, OUTPUT);
  pinMode(PIN_CLK, OUTPUT);
  pinMode(PIN_MOSI, OUTPUT);
  pinMode(PIN_MISO, INPUT);
  digitalWrite(PIN_CS, HIGH);
  digitalWrite(PIN_CLK, LOW);

  // Ultrasonidos
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

  // Salidas
  pinMode(LED_ROJO, OUTPUT);
  pinMode(LED_AMARILLO, OUTPUT);
  pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
```

```
  pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);

  // LCD
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("System Ready");
  delay(1000);
  lcd.clear();
}

// ---------------- LOOP ----------------
void loop() {
  int distanciaFinal = calcularDistanciaFinal();

  // Reset
  digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
  digitalWrite(LED_AMARILLO, LOW);
  digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
  noTone(BUZZER_PIN);

  // LCD
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("DIST: ");
  lcd.print(distanciaFinal);
  lcd.print(" cm   ");

  lcd.setCursor(0, 1);

  // Lógica alarmas
  if (distanciaFinal < UMBRAL_PELIGRO) {
    digitalWrite(LED_ROJO, HIGH);
    lcd.print("DANGER       ");
    tone(BUZZER_PIN, FREC_PELIGRO);
  }
  else if (distanciaFinal < UMBRAL_SAFE) {
    digitalWrite(LED_AMARILLO, HIGH);
    lcd.print("CAUTION      ");
    tone(BUZZER_PIN, FREC_CAUTION, 100);
  }
  else {
    digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
    lcd.print("SAFE         ");
  }

  delay(200);
}
```