



universidad  
de león



# **Escuela de Ingenierías**

## **Industrial, Informática y Aeroespacial**

### **GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

#### **DESARROLLO DE UN ROBOT AUTÓNOMO MULTIFUNCIONAL DE BAJO COSTE**

#### **DEVELOPMENT OF A LOW COST, MULTIFUNCTIONAL AUTONOMOUS ROBOT**

Autor: Jorge Ortega Camazón  
Tutor: Ángela Díez Díez  
Tutor: Jesús Lozano Arias

(Julio, 2024)

# Resumen

El presente trabajo de fin de grado se centra en el diseño y desarrollo de un robot autónomo multifuncional con un enfoque económico. El principal objetivo es crear un dispositivo versátil, capaz de llevar a cabo diversas tareas sin necesidad de intervención humana a través de una implementación a bajo coste.

En cuanto a su metodología, se hará el diseño del hardware eligiendo sensores y actuadores asequibles y de buena calidad que permitan la percepción del entorno y la movilidad del robot. Así mismo se asegurará que los materiales del chasis sean resistentes para que el robot sea firme y adaptable haciendo posible su uso en diferentes superficies.

El desarrollo electrónico se efectuará en código abierto e incluirá un sistema de control que mediante diferentes instrucciones y operaciones determinará como el robot debe moverse permitiendo de este modo la navegación autónoma del mismo. Por otra parte, se elaborará una interfaz de usuario robusta que facilite la comunicación entre el usuario y el robot para la supervisión de las actividades realizadas.

Finalmente, para evaluar los resultados obtenidos se llevarán a cabo una serie de pruebas con el fin de examinar la funcionalidad, precisión y velocidad de respuesta en diferentes escenarios.

# Abstract

The present bachelor's thesis focuses on the design and development of a multifunctional autonomous robot with an economic approach. The main objective is to create a versatile, low-cost device capable of performing various tasks without any human intervention.

Regarding the methodology, the hardware will be designed by selecting affordable, high-quality sensors. Actuators for the environmental perception and robot mobility will also be implemented. Additionally, the Project perimeters ensured that the chassis materials are resilient making the robot adaptable and resistant, enabling it's use on different surfaces.

The electronic development will be carried out in open-source coding. The software will include a control system that, through different instructions and operations, will determine the movement of the robot allowing the autonomous navigation. On the other hand, a robust user interface will be developed to facilitate the communication between the user and the robot for activity monitoring.

Finally, a series of tests will be carried out to assess the obtained results. Functionality, accuracy, and response speed will be examined in different scenarios.

# Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN .....	10
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	11
3. ESTADO DEL ARTE.....	12
3.1 AMR. ORIGEN Y DEFINICIÓN .....	12
3.2 LOW COST.....	18
3.3 ESTUDIO DE MERCADO Y PROYECTOS SIMILARES .....	19
3.3.1 ROBOT MÓVIL RB-SUMMIT .....	19
3.3.2 ROBOT MÓVIL RB-WATCHER.....	20
3.3.3 ROSMASTER X3 (2024).....	21
4. DISEÑO DEL ROBOT .....	22
4.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	22
4.1.1 ASPECTOS FUNCIONALES.....	22
4.1.2 ASPECTOS NO FUNCIONALES .....	23
4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES .....	23
4.2.1 MICROCONTROLADORES.....	23
4.2.2 SENSORES .....	27
4.2.2.1 RPLIDAR A1M8 .....	28
4.2.2.2 ESP32-CAM .....	31
4.2.2.3 MÓDULO GPS NEO-M8N 0-10.....	32
4.2.3 ACTUADORES.....	33
4.2.3.1 MOTORES NEMA 17 .....	33
4.2.3.2 DRIVER A4988 .....	35
4.2.4 FUENTE DE ENERGÍA.....	36
4.2.5 OTROS COMPONENTES .....	37
4.3 DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN .....	38
5. NORMATIVA.....	42
6. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT .....	43
6.1 ENTORNO DE DESARROLLO.....	43
6.2 EXPLICACIÓN DEL CÓDIGO .....	43
6.3 DIAGRAMA CIRCUITAL .....	47

7. PRESUPUESTO .....	48
8. TEMPORALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	51
9. POSIBLES MEJORAS .....	53
10. CONCLUSIONES.....	54
11. AGRADECIMIENTOS .....	56
12. BIBLIOGRAFÍA .....	57

# Índice de figuras

Figura 3.1.1 W. Grey Walter en los años 50 (Fuente:[2]) .....	14
Figura 3.1.2 Shakey y Charles Rosen, promotor del proyecto (Fuente: [4]).....	15
Figura 3.1.3 Stanford Cart entre obstáculos (Fuente: [6]) .....	16
Figura 3.1.4 Joseph Bosworth, creador del RB5X (Fuente: [7]) .....	17
Figura 3.1.5 Sojourner en Marte (Fuente: [9]) .....	18
Figura 4.2.1.1 Esquema eléctrico ESP-WROOM-32 (Fuente:[14]) .....	26
Figura 4.2.1.2 Esquema periféricos ESP-WROOM-32 (Fuente:[14]) .....	26
Figura 4.2.1.3 ESP32 de Espressif Systems (Fuente:[15]) .....	27
Figura 4.2.2.1 Funcionamiento sensor LiDAR (Fuente:[16]) .....	28
Figura 4.2.2.1.1 Esquema de funcionamiento del RPLIDAR A1M8 (Fuente:[16])	29
Figura 4.2.2.1.2 Mapa del espacio escaneado por el RPLIDAR A1 (Fuente:[17])	30
Figura 4.2.2.1.3 Esquema del protocolo de comunicación del RPLIDAR (Fuente:[18]).....	31
Figura 4.2.2.2.1 ESP32-CAM y adaptador USB (Fuente:[20]) .....	33
Figura 4.2.2.3.1 Módulo GPS NEO M8N 0-10 (Fuente:[21]) .....	34
Figura 4.2.3.1.1 Funcionamiento motor de pasos (Fuente:[22]).....	35
Figura 4.2.3.1.2 Motor Nema 17 (Fuente: [23], [24]) .....	36
Figura 4.2.3.2.1 Driver A4988 (Fuente:[25]) .....	37
Figura 4.2.4.1 Batería de 12V (Fuente:[26]) .....	37
Figura 4.2.4.2 Batería portátil de 10000 mAh (Fuente:[27]) .....	38
Figura 4.2.5.1 Acopladores para motor NEMA 17 (Fuente:[23]).....	39
Figura 4.3.1 Bocetos del diseño de la estructura (Fuente: Jorge Ortega) .....	40
Figura 4.3.2 Chasis del robot (Fuente: Jorge Ortega) .....	40
Figura 4.3.3 Detalles del chasis (Fuente: Jorge Ortega) .....	41
Figura 4.3.4 Detalles del chasis (Fuente: Jorge Ortega) .....	41
Figura 4.3.5 Chasis completo 1 (Fuente: Jorge Ortega) .....	42
Figura 4.3.6 Chasis completo 2 (Fuente: Jorge Ortega) .....	42
Figura 6.2.1 Código de inicialización del LiDAR.....	44
Figura 6.2.2 Código para obtener valores del GPS .....	45
Figura 6.2.3 Programación del control por Bluetooth .....	45

Figura 6.2.4 Flujograma del código .....	46
Figura 6.2.5 Proceso de obtención de datos en el RPLIDAR (Fuente:[17]) .....	47
Figura 6.3.1 Diagrama del circuito .....	48
Figura 8.1 Diagrama de Gantt parte 1 .....	53
Figura 8.2 Diagrama de Gantt parte 2 .....	53

# Índice de cuadros y tablas

Tabla 4.2.2.1.1 Información de los puntos muestreados por el RPLIDAR A1 (Fuente:[16]).....	30
Tabla 4.2.2.1.2 Especificaciones técnicas RPLIDAR A1M8 (Fuente: [16]) .....	32
Tabla 7.1 Evaluación del presupuesto .....	49



# Glosario

<b>AMR</b>	Robot Móvil Autónomo
<b>STRIPS</b>	Stanford Research Problem Solver
<b>NASA</b>	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio
<b>APXS</b>	Espectrómetro de rayos X de Partículas Alfa
<b>IA</b>	Inteligencia Artificial
<b>ROS</b>	Robot Operating System
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output
<b>RGBD</b>	Red Green Blue Depth Camera
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>CPU</b>	Unidad Central de Proceso
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>ROM</b>	Read Only Memory
<b>SRAM</b>	Static Random Access Memory
<b>RTC</b>	Real Time Clock
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
<b>I2C</b>	Circuitos Inter-Integrados
<b>I2S</b>	Integrated Interchip Sound
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
<b>LiDAR</b>	Light Detection And Ranging

<b>DSP</b>	Digital Signal Processor
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>CNC</b>	Control Numérico Computarizado
<b>AP</b>	Access Point
<b>STA</b>	Station

# Cuerpo del trabajo

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la robótica se ha ido paulatinamente integrando en el día a día de las personas y en mayor medida en el sector industrial. Este tipo de máquinas, a las que se denomina robots, pueden ser controladas bien por una persona o, por el contrario, realizar sus funciones de forma autónoma, es decir, sin la supervisión del ser humano.

Dentro de ellos, la implementación de los robots móviles genera grandes beneficios en la industria, aumentando la eficiencia, evitando errores humanos y aportando mayor precisión en diversos entornos de trabajo, además de reducir costes operativos. Sin embargo, una de las principales desventajas de estos dispositivos es el elevado coste que entraña su manufactura y mantenimiento. En base a estas premisas, este Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de un robot móvil autónomo de bajo coste con el fin de hacer esta tecnología más asequible a la par que accesible para pequeñas empresas y acercarla a un ámbito más amplio, como es la educación.

A lo largo de esta memoria se describirá al detalle cada actividad realizada dentro del proceso, así como un estudio sobre los robots autónomos y la funcionalidad de cada uno de los sensores y actuadores necesarios para lograr la construcción del robot.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado ofrece la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante los 4 años de formación universitaria, en un proyecto práctico y de investigación.

Por otra parte, la elaboración y defensa de este trabajo representa el último peldaño para alcanzar el título universitario cerrando así el ciclo de formación universitaria en el ámbito de la ingeniería.

A mayores, tras ser admitido en un Máster de robótica de cara a los estudios del próximo año, considero que este proyecto es idóneo para ponerme a prueba en la elaboración de un robot de estas características además de mostrar mi interés por la robótica.

Finalmente, el desarrollo de este robot contribuye en la innovación al buscar una solución económica a los complejos y costosos robots móviles autónomos que existen en el mercado.

En cuanto a los objetivos del proyecto se plantean dos objetivos principales:

- **Diseñar y construir un robot autónomo low-cost:** este engloba todo el proceso desde el diseño inicial hasta la construcción e implementación final.
- **Desarrollar el software necesario para la operación autónoma del robot:** Incluye toda la programación para la navegación y detección de obstáculos así como una interfaz sencilla con la que comunicarse con el robot.

Siempre con el objetivo de la correcta y más efectiva funcionalidad, se ajustará el diseño -tanto de componentes como de protocolos- para conseguirse la opción más rentable. De este modo, la premisa de este Trabajo será la creación de un proyecto que obtenga unos resultados fidedignos reduciendo significativamente el coste de operación con respecto a las opciones preexistentes. La metodología propuesta pasará por el análisis individual de los componentes implicados, así como su capacidad de integración y características conjuntas. Se evaluarán los resultados obtenidos mediante pruebas de hardware y software a fin de determinar en qué grado fueron satisfechos los objetivos propuestos. Finalmente, se recogerán las conclusiones del Trabajo en su conjunto.

Jorge Ortega Camazón

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 AMR: ORIGEN Y DEFINICIÓN

Echando la vista atrás en busca del origen de la robótica nos encontramos que ya en tiempos de Aristóteles se hablaba de herramientas automatizadas. Unos cuantos años más tarde, en la antigua Grecia, surgieron los primeros autómatas, de la mano del ingeniero y matemático Herón de Alejandría. Hablando de avances en la ingeniería, es obligatorio mencionar los novedosos diseños que, para el siglo XVI, propone Leonardo Da Vinci durante el Renacimiento Italiano. Sin embargo, los verdaderos avances hacia la automatización y la robótica moderna como la conocemos en la actualidad, se produjeron fundamentalmente en el siglo XX, concretamente después de la Segunda Guerra Mundial. De hecho, la palabra “robot” no fue utilizada hasta 1921 cuando el dramaturgo Karel Capek, de nacionalidad checa, popularizó el término “robota” (que significa trabajo forzado en checo) en su obra R.U.R.

Se define AMR, que significa Robot Móvil Autónomo (en inglés *Autonomous Mobile Robot*), como cualquier tipo de robot que es capaz de moverse y de tomar decisiones en un entorno cambiante sin necesidad de intervención humana directa.

Para encontrar el primer robot en la historia con estas características se debe retroceder hasta 1948, año en el que el neurólogo norteamericano William Grey Walter construyó en los laboratorios de la universidad de Bristol dos exitosos prototipos, Elmer y Elsie. Con capacidades técnicas todavía bastante limitadas, estos dos robots electromecánicos sensibles a la luz fueron capaces de moverse de manera autónoma y dirigirse a su estación de carga cuando tenían poca batería. Su movimiento carecía de rutas planificadas, simplemente circulaban girando de manera aleatoria mientras buscaban un foco de luz. Elmer y Elsie son considerados los pioneros de la movilidad autónoma y la robótica moderna e inspiraron a futuros investigadores que exploraron como la inteligencia emergente podía desarrollarse a partir de componentes básicos.

Las tortugas robot, como se las conocía por su caparazón metálico, podían expresar cuatro tipos de comportamiento diferentes: fototropismo positivo y negativo, un patrón de exploración y otro para esquivar obstáculos.

Una célula fotoeléctrica y un receptor sensible a los choques permitían a los robots obtener información suficiente del entorno para que con solamente dos motores, uno de avance y otro de giro, pudiera moverse de manera autónoma. Elmer y Elsie eran atraídas por a luz moderada y repelidas por los focos de luz muy intensos. Sin embargo, cuando la carga de sus baterías era baja circulaban por las habitaciones esquivando los obstáculos en busca de un foco de luz potente que se situaba en su estación de carga [1].



*Figura 3.1.1 W. Grey Walter en los años 50 (Fuente:[2])*

Unos años más tarde, ya en la década de los 60, el laboratorio de inteligencia artificial del instituto de investigación de Standford desarrolló el robot “Shakey”. Considerado como el primer robot capaz de percibir y razonar sobre su entorno, Shakey podía llevar a cabo tareas que requerían planificación, búsqueda de rutas y reorganización de objetos simples gracias a su avanzado software.

El proyecto se centró en desarrollar un sistema integrado capaz de controlar el robot en tiempo real. Debido a esto, se minimizó la complejidad del hardware. Shakey era propulsado por dos motores de pasos independientes e incorporaba una cámara de televisión, un sensor de distancia y una antena en su parte superior. Para evitar chocar con obstáculos, Shakey tenía en su perímetro unos sensores de contacto semejantes a unos bigotes de gato. Los comandos enviados por el ordenador hacia el vehículo y la información del vehículo al ordenador se enviaba a través de señales de radio [3].

Uno de los avances clave que Shakey trajo a la tecnología fue su arquitectura de software de 5 niveles. Este tipo de arquitectura que sería usado en el futuro por múltiples robots, junto al algoritmo de inteligencia artificial llamado “*Strips*”, permitían a Shakey ubicarse en lugares específicos dentro de un entorno de 7 habitaciones, planificar rutas óptimas, reconocer objetos y manipularlos y resolver problemas [3].



*Figura 3.1.2 Shakey y Charles Rosen, promotor del proyecto (Fuente: [4])*

Una década después, la universidad de Stanford creó el Stanford Cart, un robot cuya finalidad era estudiar el problema de controlar un robot enviado a la Luna desde la Tierra. Tardó 20 años en ser desarrollado por completo y su producto final fue capaz de navegar de forma autónoma transmitiendo imágenes por su sistema integrado de televisión.

Dotado de un hardware sencillo, 4 ruedas de bicicleta, un motor eléctrico, una batería y una cámara, estaba programado para moverse en espacios desordenados mientras recogía información del entorno en 3 dimensiones a través de su cámara. El Stanford Cart planificaba una ruta que sorteaba los obstáculos que tenía enfrente, avanzaba unos pocos metros, paraba para hacer nuevas fotos y recalculaba la ruta para evitar los nuevos obstáculos encontrados. El principal problema que tenía era que actuaba muy lentamente. El coche se movía un metro cada 10-15 minutos y tardaba mucho en recalcular las rutas [5].

Una de sus actuaciones más importantes consistió en cruzar una habitación de 20 metros de largo llena de sillas. El coche tardó 5 horas en alcanzar dicha meta convirtiéndose en el primer vehículo autónomo en completar con éxito una ruta sin intervención humana [5].



*Figura 3.1.3 Stanford Cart entre obstáculos (Fuente: [6])*

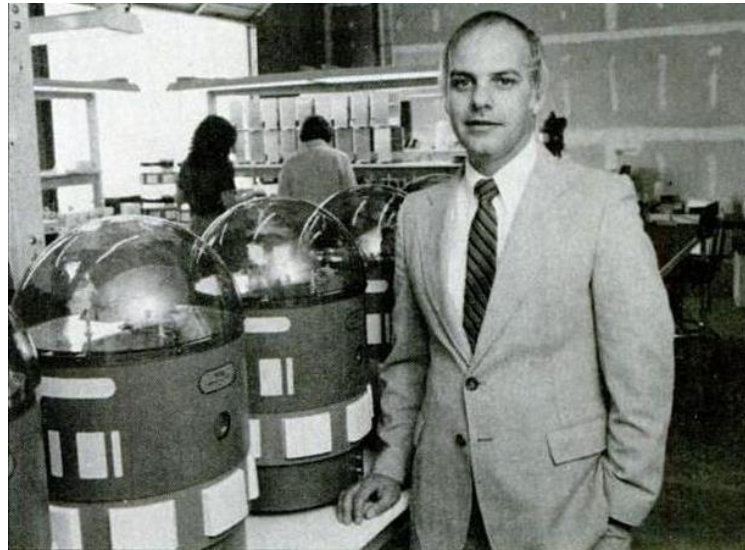
Unos cuantos años después, en 1982, salió al mercado el RB5X fabricado por RB Robot Corporation en Colorado. Este robot cilíndrico con cúpula transparente se convirtió en el primer robot de uso personal producido en masa para su posterior venta, siendo capaz de aprender de sus actuaciones previas.

EL RB5X salió a la venta con un precio inicial de 1195\$ en su modelo más básico. Este pesaba unos 5 kilogramos y estaba equipado con 8 sensores táctiles a su alrededor que le permitían detectar los obstáculos que se encontraba cuando avanzaba. Sus primeras respuestas eran aleatorias y utilizaba su experiencia para tomar mejores decisiones a medida que se iba encontrando con más obstáculos [7].

Algunos modelos posteriores incluían un brazo robótico o pinza, sensores de temperatura e incluso un extintor para usar en caso de incendios. Se le llegó a introducir un microprocesador programable que junto a su interfaz RS-232C permitía a las personas conectarlo a un ordenador para añadir funciones como el reconocimiento de voz [7].



El RB5X fue utilizado extensamente en entornos educativos y de entretenimiento debido a su multifuncionalidad. Tal fue su popularidad que se han seguido vendiendo sus versiones más actualizadas hasta hace relativamente pocos años. Su habilidad para navegar de forma autónoma y para aprender de sus errores sentaron las bases de la programación y la inteligencia artificial en la robótica educativa y es considerado uno de los robots educativos más duraderos.

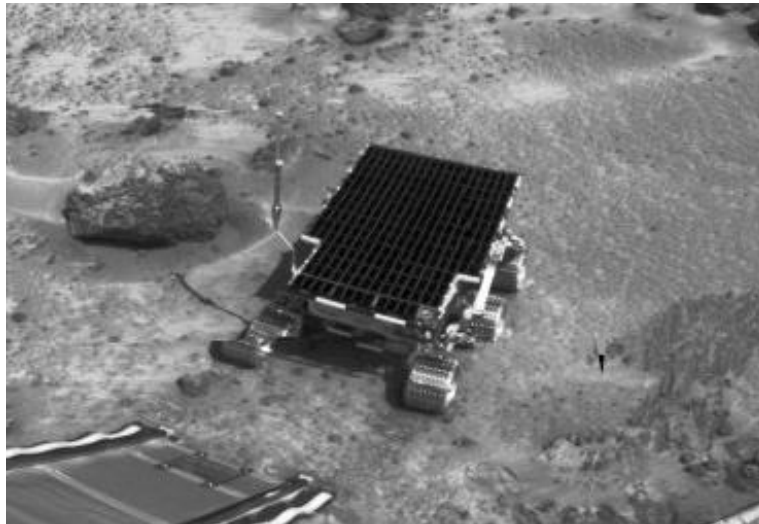


*Figura 3.1.4 Joseph Bosworth, creador del RB5X (Fuente: [7])*

Otro de los grandes avances de la robótica y de los AMR fue su uso en investigaciones espaciales. La Unión Soviética envió los primeros vehículos de exploración espacial controlados por control remoto en los años 70 y fue dos décadas más tarde cuando la NASA envió el primer robot completamente autónomo a Marte con el fin de recoger información del planeta rojo. Este primer robot fue bautizado como “*Sojourner*” en honor a la activista por los derechos de la mujer Sojourner Truth.

El Sojourner formó parte de la misión “*Mars Pathfinder*” llevada a cabo a finales del año 1996 con el objetivo de analizar en detalle la morfología del suelo marciano, la petrología de los materiales de la superficie y sus propiedades magnéticas y mecánicas. Su reducido tamaño, aproximadamente del tamaño de un microondas y solamente 10.5 kilogramos de peso, no le impidieron incorporar un avanzado hardware[8].

Venía equipado con un espectrómetro de rayos X de protones alfa (APXS) con el que se realizaron 15 análisis químicos de rocas y suelos, dos cámaras monocromáticas Kodak KAI-0371 que grababan mapas de la superficie y un sensor KAI-037M que realizó 550 fotografías en color. A su estructura de 6 ruedas se le añadió un panel solar en su cubierta que le permitió sobrevivir durante más de 80 soles [8].



*Figura 3.1.5 Sojourner en Marte (Fuente: [9])*

Sojourner marcó un antes y un después en la exploración espacial, demostrando la viabilidad de los robots autónomos en la investigación científica y sirviendo de base para las siguientes exploraciones en misiones más avanzadas. De hecho, este fue el primero de los 5 rovers que la NASA ha llevado a Marte en busca de agua o vida y se prevé que en el futuro se seguirán desarrollando más robots con la intención de pisar la Luna y Marte.

Todos estos robots móviles autónomos y sus posteriores evoluciones fueron los precursores del avance de la tecnología y el cambio hacia la automatización de procesos y a la movilidad autónoma. En la actualidad, gracias al auge de la Inteligencia Artificial (IA), su desarrollo se ha catapultado a una nueva dimensión. La capacidad de estos robots para interactuar con el entorno se ha visto mejorada enormemente. La inteligencia artificial ayuda en la navegación facilitando la localización autónoma y la planificación de rutas. Asimismo, el uso de la IA permite a los AMR adaptarse a los cambios en el entorno y aprender y mejorar su comportamiento a través de la experiencia.

Jorge Ortega Camazón

En un mundo en constante desarrollo no se puede saber cuáles serán los siguientes pasos en este avance que parece no tener límite. Cada año salen a la luz nuevos robots que desempeñan nuevas actividades o mejoran a sus antecesores. No obstante, el objetivo principal de todos estos robots siempre ha sido y será el mismo: evitar que los humanos hagan las tareas más difíciles, peligrosas, sucias y pesadas.

### **3.2 LOW COST**

Por otra parte, uno de los principales objetivos de este proyecto es dar a un Robot Autónomo Multifuncional una orientación de bajo coste: *“low cost”*. Para ello se presenta a continuación una breve reflexión sobre este tema.

El término *“low cost”* se refiere a un modelo de negocio que propone la venta de servicios o productos a un coste significativamente bajo en comparación a los grandes competidores del mismo sector. Este concepto ha ido evolucionando con el paso de las décadas introduciéndose en las diferentes industrias transformando la manera en la que las empresas y compradores toman las decisiones de compra y venta.

Puede parecer un término muy reciente, pero fue hace más de 50 años cuando la industria aeronáutica empezó a popularizarlo con la introducción de las primeras aerolíneas de bajo coste. Estas compañías aéreas ofrecían unos precios significativamente más bajos que las competidoras tradicionales gracias a la eliminación de servicios no esenciales, como la elección de asiento o las comidas a bordo, y a la reducción al mínimo de costes operativos y de estructura.

Posteriormente, otras industrias como la de la moda (Zara, Lefties, etc.), las operadoras de telecomunicaciones o el turismo han adquirido este modelo de negocio donde se prioriza un bajo coste por encima de ofrecer una calidad o un servicio excepcional. Para poder sostener los bajos precios de los servicios ofrecidos, todas estas empresas se centran en reducir los costes de adquisición de las materias primas y adaptar filosofías de mejora continua buscando reducir constantemente el desperdicio al mínimo en toda la cadena de valor, esto es, desde la captación de clientes hasta la postventa [10].

En la actualidad, con el auge de la digitalización y el comercio electrónico, el concepto “*low cost*” se ha popularizado aún más. Empresas como Aliexpress o Amazon han redefinido la cadena de suministro y la logística para ofrecer precios bajos, aprovechando economías de escala y eficiencias operativas. Incluso, se ha introducido en industrias como la de la electrónica una separación de gamas (gama alta, media y baja) en las que quedan bien diferenciadas las calidades de los productos ofertados. A todo esto se le debe añadir un cambio de visión por parte de los consumidores. Los clientes valoran más la relación calidad-precio y las empresas que ofrecen servicios a bajo coste han perdido la etiqueta de “mala calidad” [10].

En resumen, el término “*low cost*” ha evolucionado hasta convertirse en un modelo económico muy popular y apreciado por los consumidores ya que proporciona accesibilidad a los productos y servicios que son tradicionalmente más caros. Es por ello por lo que desde el comienzo de este proyecto se ha intentado desarrollar un AMR sofisticado cuyos materiales tengan un precio asequible. Eso sí, sin olvidar que en su conjunto deben satisfacer los objetivos funcionales de manera precisa.

### **3.3 ESTUDIO DE MERCADO Y PROYECTOS SIMILARES**

A la hora de realizar cualquier proyecto, es necesario conocer los avances previos que en su respectivo campo se han producido. De esta forma, nos hallamos en posición de conocer no solo el punto de partida, sino también las dificultades, debilidades y líneas de trabajo futuro. Es por ello que en esta sección se realizará un estudio de otros proyectos que se hayan llevado en el campo de la robótica similares al desarrollo planteado para este trabajo de fin de grado.

#### **3.3.1 ROBOT MÓVIL RB-SUMMIT**

El RB-SUMMIT es un robot móvil autónomo altamente versátil desarrollado por la empresa con sede central en España Robotnik. Está diseñado para operar tanto en interiores como en exteriores y cuya capacidad de carga es de hasta 50 kg [11].

Similitudes con el presente trabajo:

- Puede navegar autónomamente o ser teleoperado.
- Comunicación Bluetooth y WiFi 802.11.
- Incorpora sensor GPS.
- Opera en interiores y exteriores.

Diferencias con el presente trabajo:

- Utiliza una arquitectura de control abierta basada en ROS.
- Incorpora Cámara RGBD.
- Se carga en una estación de carga propia del robot.

Precio: 34.500-54.500 € dependiendo de los accesorios opcionales adquiridos.

De hecho, el RB-SUMMIT es uno de los robots móviles autónomos que se ha tomado como referencia para desarrollar este proyecto. Sin embargo el precio de un robot de estas características es increíblemente alto y, consecuentemente, nace la idea de desarrollar un robot similar pero mucho más asequible.

### **3.3.2 ROBOT MÓVIL RB-WATCHER**

También desarrollado por la empresa Robotnik el RB-WATCHER es un robot móvil autónomo utilizado para ejercer tareas de seguridad y vigilancia tanto en interiores como en exteriores [12].

Similitudes con el presente trabajo:

- Incorpora un sensor LiDAR.
- Comunicación Bluetooth y WiFi 802.11.
- Incorpora sensor GPS.
- Opera en interiores y exteriores.

Diferencias con el presente trabajo:

- Utiliza una arquitectura de control abierta basada en ROS.
- Incorpora Cámara de reconstrucción 3D.
- Se carga en una estación de carga propia del robot.
- Incluye sensor detector de incendios.

Precio: 45.000-60.000 € dependiendo de los accesorios opcionales adquiridos.

El RB-WATCHER es otro de los robots móviles autónomos tomados como referencia ya que incorpora un sensor LiDAR para la navegación autónoma. Del mismo modo, representa una opción más avanzada y específica con materiales de mejor calidad, pero cuyas principales funcionalidades -plantea esta investigación- pueden obtenerse a menor coste.

### **3.3.3 ROSMASTER X3 (2024)**

El ROSMASTER X3 es un robot autónomo educativo fabricado por la empresa Roboduino basado en el sistema ROS. Este robot multiplataforma realiza una gran cantidad de funciones entre las que se incluyen los objetivos de este proyecto [13].

Similitudes con el presente trabajo:

- Incorpora un sensor LiDAR A1 para la navegación autónoma.
- Puede navegar autónomamente o ser teleoperado.
- Realiza mapeos de sus alrededores.
- Estructura de aluminio.

Diferencias con el presente trabajo:

- Utiliza ruedas omnidireccionales.
- Incorpora Cámara de profundidad con reconocimiento de objetos.
- Programable con Raspberry Pi 5.
- Incluye pantalla táctil para su configuración.

Precio: 900-1.500 € en Aliexpress dependiendo de las funciones adicionales.

Este último robot sí que presenta una alternativa económica a los robots móviles autónomos y utiliza el mismo modelo de sensor LiDAR para la navegación. El precio sigue siendo superior al precio estimado que se utilizará para el desarrollo del robot detallado en este Trabajo de Fin de Grado pero utiliza materiales similares.

Comparando estos tres proyectos con el robot aquí planteado se puede ver que en el aspecto económico se puede mejorar mucho a los anteriores ofreciendo un robot con un valor añadido en términos de accesibilidad siendo capaz de realizar las funciones principales de los anteriores a un precio mucho menor.

## 4. DISEÑO DEL ROBOT

En este apartado se planea proporcionar una estructura detallada del diseño del robot, abarcando la selección y especificaciones de los componentes y materiales integrados en el desarrollo del AMR buscando siempre una estructura robusta y funcional con una visión económica.

### 4.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En esta sección se detallan las necesidades técnicas que el robot autónomo debe cumplir para satisfacer los objetivos del proyecto. Estos requerimientos incluyen aspectos funcionales y no funcionales.

#### 4.1.1 ASPECTOS FUNCIONALES

En base a las descripciones previas, dentro de los objetivos funcionales el robot debe ser capaz de llevar a cabo las siguientes tareas:

- **Navegación autónoma:** El robot debe ser capaz de moverse sin intervención humana en un entorno predeterminado, evitando impactar con obstáculos.
- **Detección de obstáculos:** El AMR debe ser capaz de detectar posibles obstáculos en su camino y mantener una distancia de seguridad respecto a ellos para evitar impactos.
- **Elaboración de mapas:** En entornos interiores como habitaciones o pasillos elaborará un mapa esquemático de las paredes y obstáculos.
- **Captura de imágenes:** El robot incorporará una cámara que permita hacer fotografías del entorno para obtener una mayor información de sus inmediaciones.
- **Medida de distancias:** Un módulo GPS permitirá obtener las coordenadas y medir distancias cuando el AMR circule por espacios al aire libre.
- **Capacidad de carga:** Se espera que el robot pueda transportar objetos pequeños con una carga cercana a los 3 kg.

### 4.1.2 ASPECTOS NO FUNCIONALES

Dentro de los objetivos que no están relacionados con la correcta funcionalidad del prototipo se tendrá en consideración lo siguiente:

- **Coste:** El proyecto pretende dar una solución a los elevados precios habituales en los AMRs. Para mantener su enfoque “*low cost*” el presupuesto de los materiales y diseños será inferior a 500 € sin incluir la mano de obra.
- **Fiabilidad:** El diseño tanto del hardware como del software del robot será robusto permitiendo el correcto funcionamiento en diversas condiciones.
- **Escalabilidad:** El proyecto estará abierto a futuras ampliaciones y adiciones de nuevas funcionalidades.
- **Mantenimiento:** El diseño del robot facilitará en todo lo posible el mantenimiento y reparación de sus componentes.

### 4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

Cada componente es elegido después de sopesar los requerimientos del sistema, el costo y la compatibilidad con los demás elementos incorporados al robot.

#### 4.2.1 MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, que puede ejecutar instrucciones grabadas en su memoria. Este incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de un ordenador, que son la unidad central de proceso (CPU), la memoria (RAM/ROM) y los periféricos de entrada y salida.

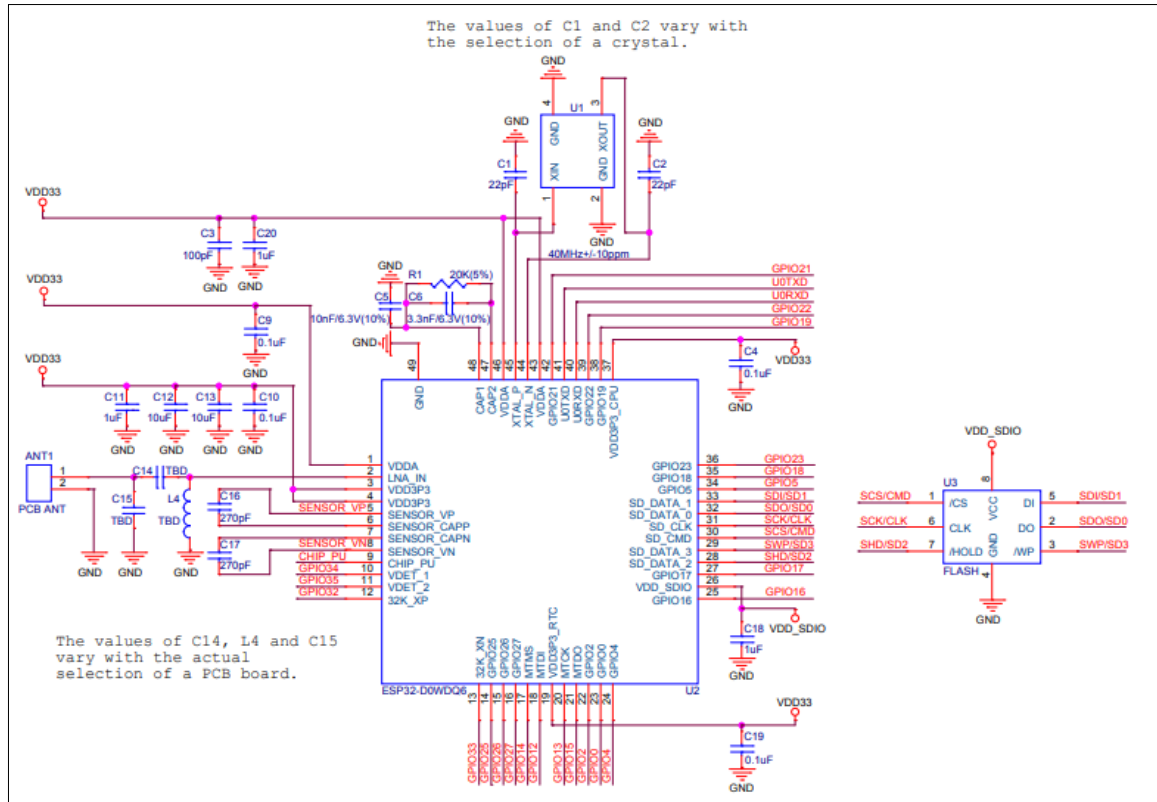
El microcontrolador elegido para desempeñar el papel del “cerebro” del robot móvil autónomo es el **ESP-WROOM-32**. El ESP32 es un microcontrolador de 32 bits de bajo coste, bajo consumo de energía y comunicación inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth desarrollado por la empresa Espressif Systems. El modelo adquirido incorpora 36 pines GPIO incluyendo una salida de 5 V que será muy importante para alimentar el sensor LiDAR.

A continuación se detallan las características funcionales más importantes de este microcontrolador:

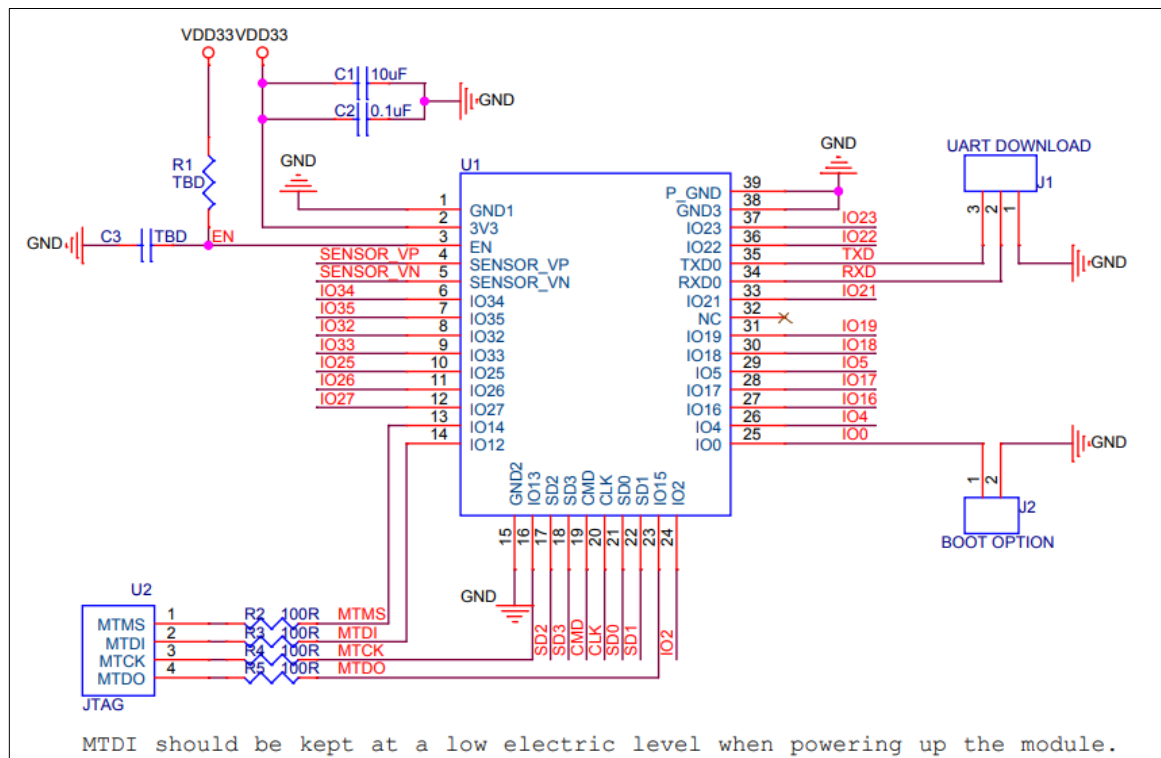


- **Procesador:** El ESP-WROOM-32 incluye un microprocesador de bajo consumo Xtensa de 32 bits LX6 que opera hasta 240 MHz. Además cuenta con un coprocesador de ultra baja energía utilizado para realizar conversiones analógico digital.
- **Memoria:** En su memoria interna cuenta con 448 KB de memoria ROM que se utiliza para el arranque, 520 KB de SRAM utilizada para almacenar datos e instrucciones y 16 KB en RTC que usa el coprocesador cuando opera en el modo deep-sleep.  
En cuanto a memoria externa se pueden añadir hasta 16 MB de memoria flash y 8 MB de memoria SRAM.
- **Temporizadores y Watchdogs:** Para la gestión del tiempo el ESP-WROOM-32 tiene 4 temporizadores de 64 bits integrados en el chip y 3 temporizadores watchdog para recuperar el sistema en ocasiones de errores.
- **Radio y Wi-Fi:** El módulo de radio incorpora un emisor y receptor de 2.4 GHz. A mayores el microcontrolador implementa TCP/IP y soporta protocolos de redes inalámbricas 802.11b/g/n alcanzando velocidades de hasta 150 Mbps.
- **Bluetooth:** El chip incorpora un controlador Bluetooth con transmisor clase 1, clase 2 y clase 3. Es compatible con Bluetooth v4.2 y Bluetooth Low Energy (BLE).
- **Periféricos:** El ESP-WROOM-32 de 38 pines cuenta con 34 pines digitales (GPIO), la mayoría configurables como “pull-up” y “pull-down”. Además, incluye un conversor analógico-digital de 12 bits y 18 canales que le permiten interactuar con sensores analógicos. Finalmente, incorpora interfaces UART, I2C, I2S y controladores PWM entre otros[14].

El esquema eléctrico y el esquema de periféricos se muestran en las figuras 4.2.1.1 y 4.2.1.2 respectivamente.



*Figura 4.2.1.1 Esquema eléctrico ESP-WROOM-32 (Fuente:[14])*



*Figura 4.2.1.2 Esquema periféricos ESP-WROOM-32 (Fuente:[14])*

En conclusión, el ESP-WROOM-32 ofrece una gran variedad de funciones con características muy notables y tiene un precio muy asequible. Es muy superior en capacidades a otros microcontroladores como el ESP8266 y el Arduino UNO siendo un microcontrolador ideal para su uso en un proyecto de estas dimensiones. Fue comprado a un precio de 5.51€.

Para el control de los motores se ha utilizado una segunda placa, el ESP32-WROOM-32D. Este también está basado en el microcontrolador ESP32 de Espressif Systems y por lo tanto comparte la mayor parte de sus características. Cuenta solamente con 30 pines en vez de 38 pero incorpora mismo procesador y memoria que el ESP-WROOM-32. A diferencia de la primera viene con un entrada micro USB.



*Figura 4.2.1.3 ESP32 de Espressif Systems (Fuente:[15])*

Su módulo Bluetooth integrado es ideal para crear una interfaz con la que interactuar con el microcontrolador y permite además poder conectarse con el primer microcontrolador. Otras maneras de conectar ambos microcontroladores son por comunicación serial, ya que ambos tienen 3 puertos de comunicación UART, y por WiFi configurando un módulo como AP y otro como STA.

La elección de usar dos microcontroladores se ha hecho con el objetivo de reducir el tamaño de los programas que se necesitan. Esto agiliza los procesos de compilación de los códigos y permite a los microcontroladores trabajar con una

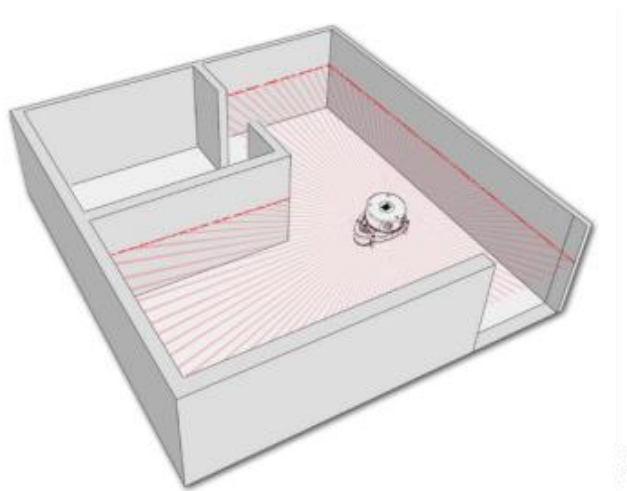
menor cantidad de datos exigiéndoles así menos trabajo. Por otro lado cada microcontrolador tiene varios pines de salida que no conviene usar debido a que son compartidos con otras funcionalidades. Al separar las actividades de ambos reducimos el número de cables que usamos para controlar todos los sensores y actuadores.

#### 4.2.2 SENSORES

Un sensor es un dispositivo sensible al entorno físico y que produce como salida una señal legible correspondiente a la variable medida. En el desarrollo de un robot móvil autónomo son fundamentales para realizar la navegación, mapeo y percepción del entorno.

Antes de comenzar a detallar las características de cada sensor utilizado en el desarrollo de este proyecto se hará una breve explicación de los sensores LiDAR que es el componente principal y más importante del AMR.

Un sensor LiDAR (Light Detection And Ranging) es un dispositivo que mide distancias de manera precisa mediante la emisión de un láser. Para determinar la distancia el sensor mide el tiempo que pasa desde la emisión hasta la reflexión del haz de luz en el objeto. La información recopilada por el sensor puede ser utilizada para detectar la posición y forma de los objetos e incluso crear un mapa detallado del entorno escaneando en 360 grados. Debido a esto se han convertido en un sensor muy importante para la navegación autónoma.

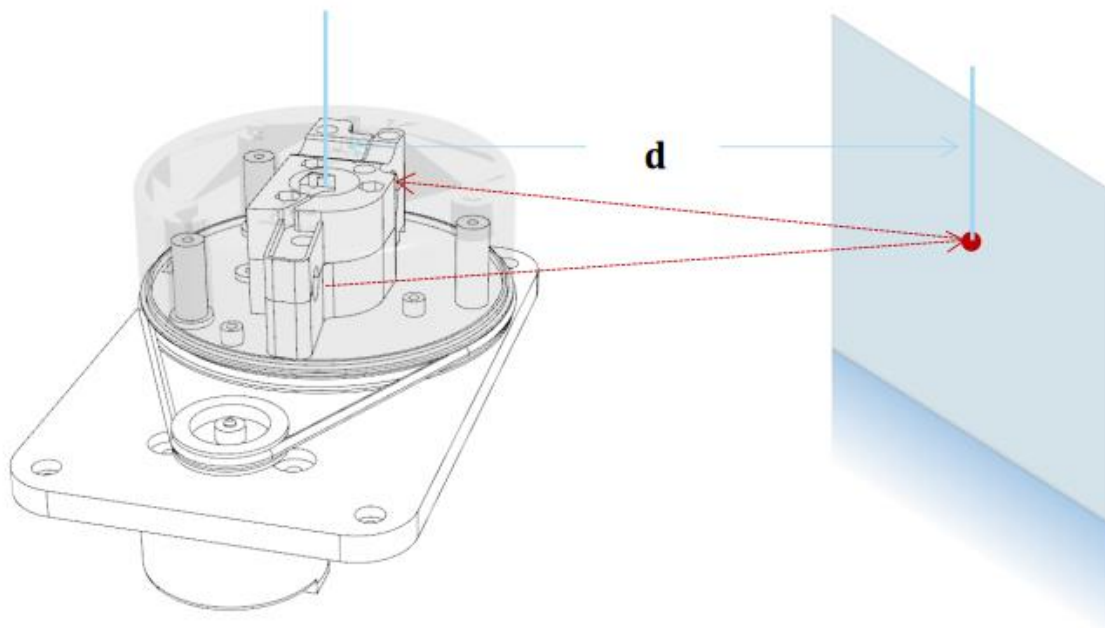


*Figura 4.2.2.1 Funcionamiento sensor LiDAR (Fuente:[16])*

#### 4.2.2.1 RPLIDAR A1M8

El RPLIDAR A1M8 es un escáner láser 2D de bajo coste diseñado y producido por la empresa SLAMTEC. El sensor escanea los 360 grados en un rango de hasta 12 metros produciendo una nube de puntos usada para el mapeo y localización de objetos. Este sensor consta de un escáner láser y un motor de pasos que hace girar el escáner en sentido horario.

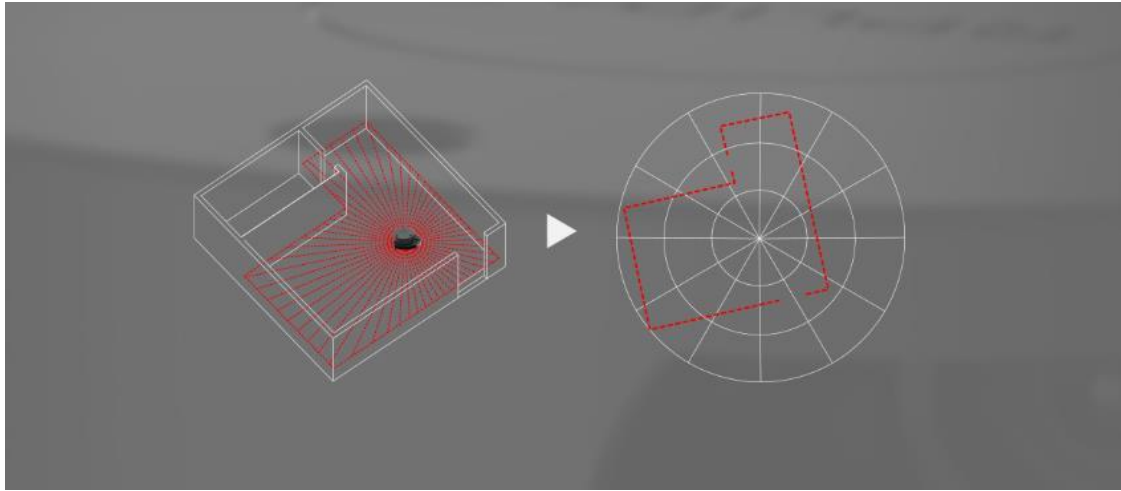
El RPLIDAR está basado en un sistema de medida por triangulación láser en el que el LiDAR emite una señal láser infrarroja y dicha señal láser es reflejada por un objeto o pared. La señal de retorno es muestreada por el sistema de adquisición de visión en el RPLIDAR A1M8 y su procesador digital de señales (DSP) comienza a procesar los datos muestreados y a emitir valores de distancia y ángulos entre el objeto y el sensor a través de la interfaz de comunicación[16].



*Figura 4.2.2.1.1 Esquema de funcionamiento del RPLIDAR A1M8 (Fuente:[16])*

Durante la fase de escaneo el sensor emite más de 8000 rayos láser por segundo obteniendo como dato una nube de puntos con el valor de las distancias a los objetos que están situados en los 360 grados de giro, es decir, a su alrededor. Representando en un plano todos los puntos obtenidos en una rotación completa

se obtiene un mapa del espacio en el que está situado el sensor RPLIDAR en el instante de la medición.



*Figura 4.2.2.1.2 Mapa del espacio escaneado por el RPLIDAR A1 (Fuente:[17])*

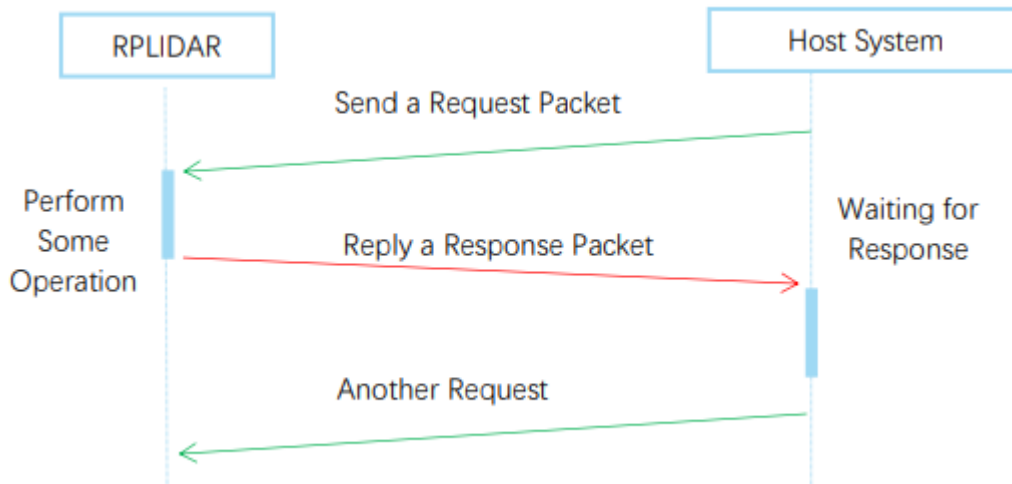
Cada punto que toma como dato el sensor es muestreado por la interfaz de comunicación y como salida se obtienen cuatro tipos de datos por cada uno de estos puntos. Esta información queda detallada en la siguiente tabla:

*Tabla 4.2.2.1.1 Información de los puntos muestreados por el RPLIDAR A1 (Fuente:[16])*

Tipo de dato	Unidad	Descripción
Distancia	Milímetros (mm)	Valor de la distancia entre el módulo de rotación del RPLIDAR A1 y el punto de muestra en el instante de la medición.
Ángulo	Grados (°)	Ángulo actual del rumbo de medición
Calidad	Nivel	Nivel de calidad de la medición
Señal de comienzo	(Booleano)	Señal de comienzo de una nueva medición

En cuanto a la comunicación con el sensor, el RPLIDAR utiliza una interfaz de comunicación serial UART basada en la solicitud y envío de uno o varios paquetes de datos. En base a esta comunicación, el sistema servidor puede recibir los datos escaneados, el estado del dispositivo, información del estado de salud del sensor, etc.

La comunicación comienza siempre con una solicitud por parte del “host” que es el que hace uso del sensor. Cuando el sensor recibe la solicitud envía a continuación uno o varios paquetes de datos como respuesta y espera a la siguiente solicitud.



*Figura 4.2.2.1.3 Esquema del protocolo de comunicación del RPLIDAR  
(Fuente:[18])*

Existen solamente 9 solicitudes diferentes que el sistema servidor puede realizar y son los siguientes:

- **STOP:** Para el estado actual del sensor y entra en modo inactivo.
- **RESET:** Resetea el núcleo del RPLIDAR.
- **SCAN:** Entra en el estado de escaneo.
- **EXPRESS\_SCAN:** Entra en el estado de escaneo trabajando a velocidad máxima.
- **FORCE\_SCAN:** Entra en el estado de escaneo fuerza los datos de salida sin revisar la velocidad de rotación.
- **GET\_INFO:** Envía la información del dispositivo.
- **GET\_HEALTH:** Envía la información del estado de salud del dispositivo.
- **GET\_SAMPLERATE:** Envía la velocidad de muestreo.
- **GET\_LIDAR\_CONF:** Obtiene la configuración del LIDAR.

En este proyecto, este sensor realiza las funciones más importantes para permitir la navegación autónoma. Estará en funcionamiento constantemente y medirá en tiempo real los valores de las distancias respecto a los diferentes objetos que el robot se encuentre a su alrededor. Estos datos serán enviados al microcontrolador que es el encargado de ejecutar las órdenes de movimiento a los motores en función de los valores recibidos.

En la tabla 3.2 se detallan las características eléctricas más relevantes del sensor.

*Tabla 4.2.2.1.2 Especificaciones técnicas RPLIDAR A1M8 (Fuente: [16])*

Parámetro	Unidad	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Rango	Metros (m)	0.15	—	12
Frecuencia de giro	Hercios (Hz)	1	5.5	10
Voltaje de escaneo	Voltios (V)	4.9	5	5.5
Corriente de escaneo	Miliamperios (mA)	—	300	350
Voltaje del motor	Voltios (V)	5	5	9
Corriente del motor	Miliamperios (mA)	—	100	—
Temperatura de trabajo	Grados Celsius (°C)	0	20	40

#### 4.2.2.2 ESP32-CAM

El módulo ESP32-CAM es un dispositivo de bajo coste que incorpora una versión reducida del microcontrolador ESP32 (concretamente el ESP-32S) y una pequeña cámara de vídeo OV2640 de 1600 x 1200 píxeles de resolución con led flash integrado. Incluye además una ranura para tarjetas microSD donde se pueden almacenar fotos o vídeos. Su cámara permite el reconocimiento facial y detección de movimiento además de la toma de fotos y la posibilidad de grabar vídeos en directo[19].



Su microcontrolador con arquitectura de 32 bits comparte gran parte de las características funcionales del ESP32 detallado anteriormente. Entre ellas el mismo procesador, conectividad Wi-Fi y Bluetooth y misma memoria SRAM. Soporta también interfaces UART, SPI, I2C y PWM.

El gran defecto que tiene este módulo es la ausencia de un puerto USB. Esto obliga a utilizar 6 de sus 16 pines para poder cargar los diferentes programas. Como solución se ha adquirido un adaptador ESP32-CAM-MB que provee al ESP32 CAM de un conector micro USB hembra para poder programar y alimentar el módulo de manera sencilla.

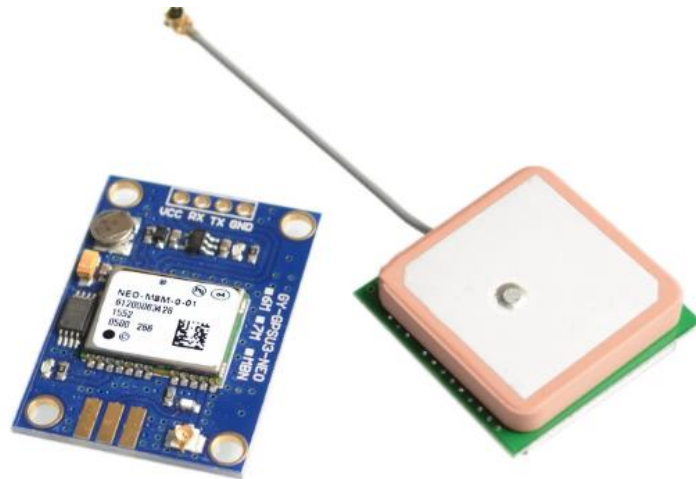


*Figura 4.2.2.2.1 ESP32-CAM y adaptador USB (Fuente:[20])*

#### **4.2.2.3 MÓDULO GPS NEO-M8N 0-10**

Este módulo GPS desarrollado por la empresa u-blox es un receptor GPS de alta precisión ampliamente utilizado en los sistemas de navegación y vehículos autónomos. Entre sus características destacan las siguientes:

- Soporta sistemas GPS, GLONASS y Galileo.
- Capacidad de rastreo de múltiples satélites al mismo tiempo para aportar una alta precisión de posición.
- Bajo consumo de energía.
- Tasa de actualización de 10 Hz.
- Interfaces UART y SPI.
- Antena externa para mejor recepción de la señal.



*Figura 4.2.2.3.1 Módulo GPS NEO M8N 0-10 (Fuente:[21])*

### **4.2.3 ACTUADORES**

Un actuador es un dispositivo que transforma las señales de control enviadas por el microcontrolador en una acción física. Suelen realizar funciones de movimiento, control de posición y manipulación de objetos. En este proyecto se cuenta con 4 motores de pasos para mover la estructura de manera precisa y controlada.

#### **4.2.3.1 MOTORES NEMA 17**

Para permitir la velocidad de este AMR se ha escogido utilizar 4 motores de pasos Nema 17. Para poder medir los datos con el sensor LiDAR en una estructura en movimiento no es recomendable que el sensor se esté desplazando rápidamente. Por este motivo, las necesidades de este prototipo requieren unos motores que proporcionen un gran par motor a bajas revoluciones para proporcionar un movimiento preciso.

El par motor o torque es un parámetro que indica la fuerza que realiza el motor al realizar su paso por unidad de longitud. Habitualmente se mide en Newtons por metro (N·m).

Los motores de pasos son motores de corriente continua sin escobillas que cumplen a la perfección con esta necesidad. Normalmente dividen su revolución en 200 pasos de 1.8 grados de giro. Están formados por un estator que es la parte fija del motor y está formado por una o más bobinas y un rotor que es la parte giratoria

del motor. Los motores de pasos se controlan por mediación de un driver que se encarga de activar de manera secuencial las bobinas, creando campos magnéticos que interactúan con los polos del rotor.

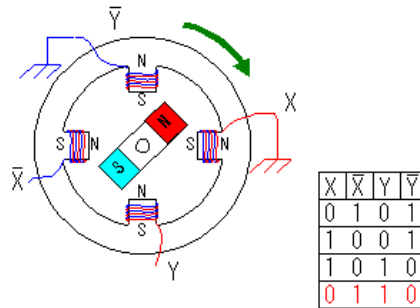


Figura 4.2.3.1.1 Funcionamiento motor de pasos (Fuente:[22])

Los motores Nema 17 son un tipo de motor paso a paso bipolar (formado por dos bobinas) comúnmente utilizados en impresoras 3D y máquinas CNC. Tienen un par motor de 4.8 kg·cm que equivale prácticamente a 0.5 N·m. Con este dato se puede hacer una estimación del peso que puede mover el AMR.

El torque aplicado a la rueda se relaciona con la fuerza a través del radio. Con unas ruedas de 6 cm de radio que tiene el robot la fuerza ejercida por cada motor es la siguiente:

$$F = \frac{\tau}{r} = \frac{0.5Nm}{0.06m} \approx 8.33N \quad (4.1)$$

Dado que el robot tiene 4 motores que trabajan por igual:

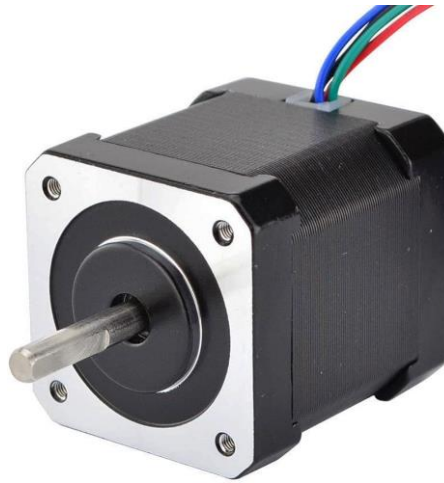
$$F_{TOTAL} = 4 * 8.33N = 33.32N \quad (4.2)$$

La masa que podrá mover se calcula mediante la relación entre fuerza total y fuerza de fricción:

$$m \leq \frac{F_{TOTAL}}{\mu \cdot g} = \frac{33.32N}{0.7 \cdot \frac{9.81m}{s^2}} = 4.85kg \quad (4.3)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre la goma de las ruedas y el suelo de cemento.

Los motores Nema 17 serán capaces de mover una carga cercana a los 5 kilogramos incluyendo el peso del propio robot.



*Figura 4.2.3.1.2 Motor Nema 17 (Fuente: [23], [24])*

El eje del motor tiene una medida estándar de 5 milímetros. Como defecto se podría decir que son bastante pesados. Cada motor NEMA 17 pesa 0.34 kg, por lo tanto de los 4.85 kilos que podrá mover el robot 1.36 corresponde a estos motores.

#### **4.2.3.2 DRIVER A4988**

Para el control de los motores paso a paso utilizados se ha escogido el driver A4988, un driver muy popular diseñado por la empresa Allegro que permite un control preciso de este tipo de motores bipolares. Este driver permite el control de corriente para configurar la salida de corriente y poder así usar voltajes por encima del voltaje nominal del motor. A continuación, se detallan algunas de sus características más importantes:

- 5 resoluciones de pasos diferentes: paso completo, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16.
- Control de corriente automático para proteger los motores.
- Protección térmica por sobrecarga y por bajo voltaje.
- Voltaje de funcionamiento: 8-35 V.
- Corriente de salida:  $\pm 2$  A.
- Interfaz sencilla de control mediante pulsos de pasos y de dirección (STEP y DIR).
- Incluye un disipador de calor para mejores prestaciones.

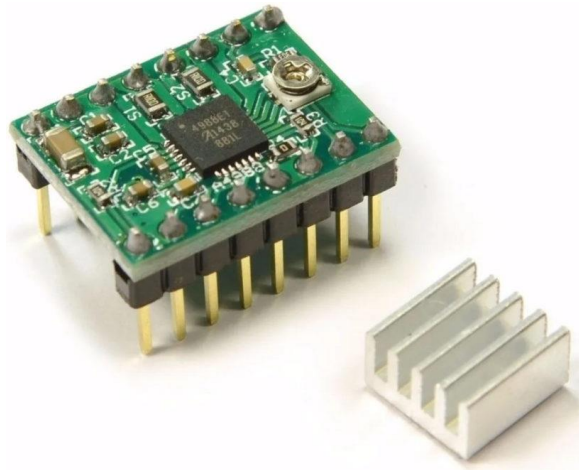


Figura 4.2.3.2.1 Driver A4988 (Fuente:[25])

#### 4.2.4 FUENTE DE ENERGÍA

Las baterías del robot son las encargadas de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos en su conjunto. La elección del tipo de baterías depende de varios factores, es necesario considerar la capacidad, el peso, el tamaño y el consumo de energía de cada componente.

Conociendo todos estos factores se ha decidido incorporar dos baterías al robot. Una de 12 voltios para alimentar los motores de las ruedas y una de 5 voltios para alimentar los microcontroladores y todos los sensores. Para batería de 12 voltios se ha escogido un modelo recargable de 3000 mAh de bajo precio.



Figura 4.2.4.1 Batería de 12V (Fuente:[26])

Para la segunda batería se usará una batería portátil de la marca Cellularline previamente adquirida de 10000 mAh que da 5V y 2.4 A a la salida.



*Figura 4.2.4.2 Batería portátil de 10000 mAh (Fuente:[27])*

#### **4.2.5 OTROS COMPONENTES**

Para la elaboración del chasis sobre el que reposan todos los sensores se han elegido materiales ligeros al mismo tiempo que resistentes. El objetivo es conseguir una estructura firme y duradera en la que poder sostener cada sensor sin peligro de ser dañados. Al mismo tiempo, tras calcular la masa total que puede ser movida por los 4 motores se ha adaptado la selección de estos materiales para construir una base ligera. Todo ello sin olvidarse de la orientación “*low cost*” que se implantó al comienzo del proyecto como requisito de gran importancia.

Considerando todo lo anterior se ha escogido fabricar una estructura con barras de aluminio a la que se ha atornillado una lámina de polietileno de 2 mm de grosor. Las barras de aluminio son barras cuadradas de 10 mm de lado y 1 mm de grosor. Al ser huecas se reduce mucho el peso del metal sin comprometer la rigidez del aluminio. La lámina de polietileno conforma una base lisa flexible y ligera para facilitar su manipulación y está hecha de un material aislante evitando los posibles contactos de los sensores y cables con el aluminio.

Por otro lado se ha recurrido a la impresión 3D para hacer los soportes de los motores NEMA 17 y para hacer una base para el sensor LiDAR que lo eleve unos centímetros y evitar que los demás componentes obstaculicen el escaneo de los datos. El plástico utilizado por estas impresoras tiene una gran resistencia a los esfuerzos de compresión y es un material muy ligero.

En cuanto al sistema de tracción, se han elegido ruedas notablemente grandes para hacer más fácil el movimiento en exteriores donde el terreno puede ser irregular.

Para acoplar las ruedas a los motores se ha comprado un acoplador de latón para cada una de ellas que tiene un agujero de 5 mm para el eje del motor por un lado y forma de tuerca de métrica 4 por el otro que encaja a la perfección con el diseño de las ruedas.



*Figura 4.2.5.1 Acopladores para motor NEMA 17 (Fuente:[23])*

### **4.3 DISEÑO MECÁNICO Y CONTRUCCIÓN**

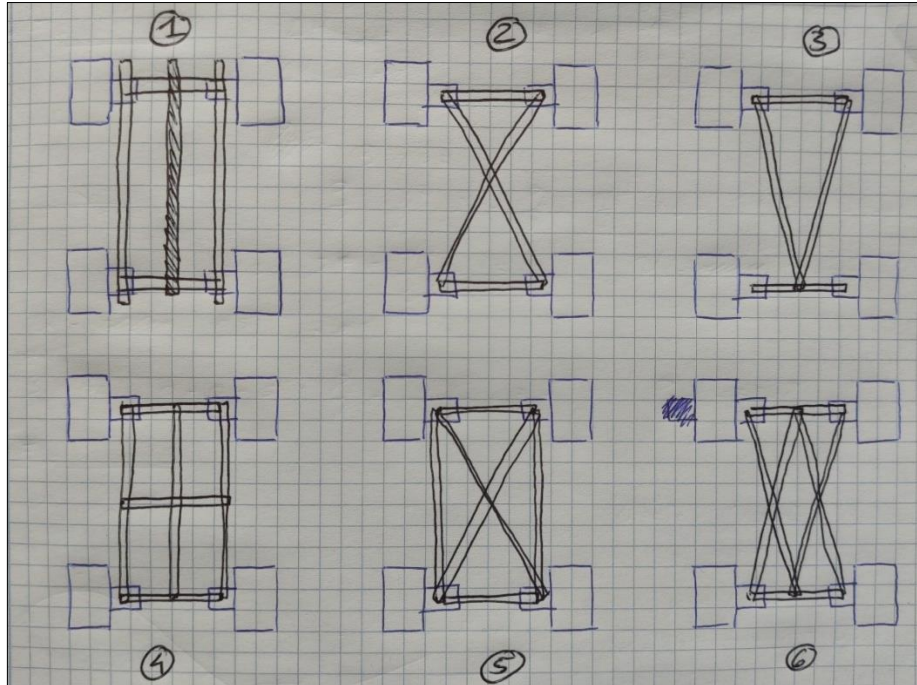
En este apartado se pretende describir en mayor detalle el diseño del chasis del robot. Este diseño ha sido pensado para aportar la mayor rigidez posible a una estructura formada por perfiles rectangulares de aluminio.

El diseño elegido consiste en una estructura rectangular reforzada en su interior con 4 barras dispuestas en forma de cruz. Estas últimas proporcionan una gran rigidez a los esfuerzos de torsión y garantizan la estabilidad del robot. Al ser una estructura simétrica la distribución de cargas queda perfectamente equilibrada.

Para reforzar las uniones entre las barras de aluminio, que son los puntos más susceptibles de romperse, se ha atornillado la estructura a través de escuadras de fijación de acero.



Como resultado se ha fabricado una estructura muy resistente a todo tipo de esfuerzos. Además, los materiales utilizados son baratos y fáciles de conseguir y en su conjunto forman un chasis muy ligero.



*Figura 4.3.1 Bocetos del diseño de la estructura (Fuente: Jorge Ortega)*

El diseño final escogido fue el diseño número 4 y el resultado final se muestra en las siguientes figuras.



*Figura 4.3.2 Chasis del robot (Fuente: Jorge Ortega)*

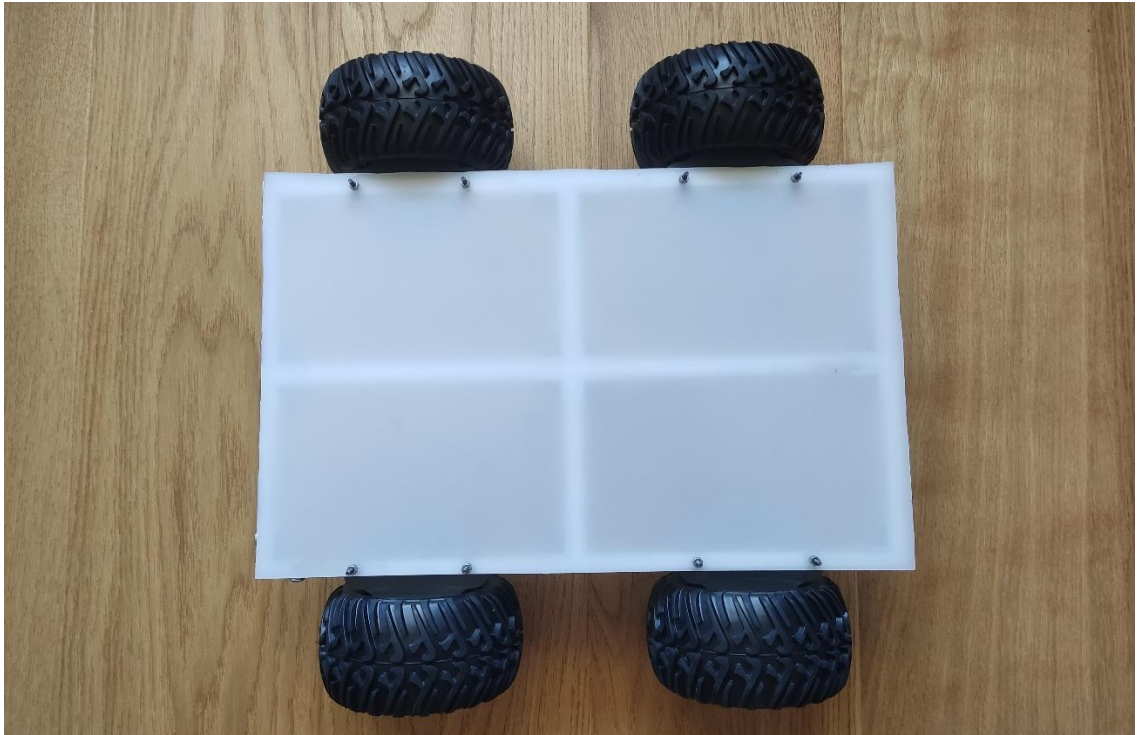




*Figura 4.3.3 Detalles del chasis (Fuente: Jorge Ortega)*



*Figura 4.3.4 Detalles del chasis (Fuente: Jorge Ortega)*



*Figura 4.3.5 Chasis completo 1 (Fuente: Jorge Ortega)*



*Figura 4.3.6 Chasis completo 2 (Fuente: Jorge Ortega)*

## 5. NORMATIVA

A la hora de construir un robot es necesario hacer un estudio previo de las normativas que regulan dicha actividad. Estas pueden ser distintas dependiendo de la región. A continuación se describen las normativas consideradas:

El RPLIDAR A1 usa un láser infrarrojo de baja potencia ( $<5\text{mW}$ ) como fuente de luz y lo impulsa utilizando pulsos modulados. El láser es emitido en una franja de tiempo muy corta lo que garantiza la seguridad para los humanos y cumple con el estándar de seguridad láser Clase 1. Cumple también con la regulación 21 1040.10 y 1040.11 del 24 de Junio de 2007[16].

Del mismo modo se ha asegurado que el robot cumpla con la normativa UNE-en ISO 13482 para robots y dispositivos electrónicos y los requisitos de seguridad para robots no industriales[28].

Finalmente, todos los componentes comprados cuentan con el marcado CE. Este certificado asegura que el robot cumple con los requisitos de seguridad y protección ambiental.

## 6. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT

En este apartado se busca aclarar los aspectos fundamentales para el correcto funcionamiento del robot. Cada dispositivo debe realizar su función para que en su conjunto el robot pueda operar de manera efectiva.

### 6.1 ENTORNO DE DESARROLLO

Para la programación del robot se escogió inicialmente Arduino IDE como entorno de desarrollo debido a la sencillez que ofrece para programar los microcontroladores. Además, gracias a su popularidad en proyectos de robótica existe una gran comunidad en internet de personas que comparten sus programas y dudas. Esto facilita la búsqueda de información ya que existen muchos más recursos que de otras plataformas.

Más adelante durante el desarrollo de los programas se cambió de idea para pasar a utilizar Platform.IO, una extensión de Visual Studio Code. Esta ofrece un entorno más avanzado de programación y es compatible con el ESP32. Como ventaja utiliza librerías de internet y se evita un gran problema ya que Arduino IDE usa por defecto librerías de Arduino y las busca en directorios preestablecidos.

### 6.2 EXPLICACIÓN DEL CÓDIGO

Para programar el robot se necesita un programa que inicialice las actividades del sensor LiDAR. Para ello se ha utilizado la librería “RPLidar.h” donde vienen predefinidas las funciones necesarias para que el sensor funcione de forma segura.

```

20 // EMPIEZA A GIRAR EL MOTOR
21 analogWrite(RPLIDAR_MOTOR, 255);
22
23 // COMIENZA LA FUNCION DE ESCANEO
24 lidar.startScan();
25 }
26
27 void loop() {
28   if (IS_OK(lidar.waitPoint())) {
29     float distance = lidar.getCurrentPoint().distance; // DISTANCIA EN MILIMETROS
30     float angle = lidar.getCurrentPoint().angle; // ANGULO EN GRADOS
31     bool startBit = lidar.getCurrentPoint().startBit; // INDICA PRIMER PUNTO DEL ESCANEO
32     byte quality = lidar.getCurrentPoint().quality; // CALIDAD DEL DATO MEDIDO
  
```

*Figura 6.2.1 Código de inicialización del LiDAR*

Por otra parte, el sensor GPS está constantemente recibiendo valores con los que se puede determinar la posición del robot en zonas exteriores.

```
void loop() {
  // Verifica si hay datos disponibles en el puerto UART2 (GPS)
  while (GPS.available()) {
    // Lee un byte del GPS y pásalo al objeto TinyGPSPlus
    gps.encode(GPS.read());
  }

  // Si hay datos de posición válidos
  if (gps.location.isUpdated()) {
    // Mostrar información de posición
    Serial.print("Latitud: ");
    Serial.println(gps.location.lat(), 6); // 6 dígitos de precisión
    Serial.print("Longitud: ");
    Serial.println(gps.location.lng(), 6);
    Serial.print("Altitud (metros): ");
  }
}
```

Figura 6.2.2 Código para obtener valores del GPS

Finalmente se ha añadido la posibilidad de controlar el robot mediante una aplicación gratuita que permite conectar por Bluetooth el robot y controlarlo a través de un dispositivo móvil usando una interfaz que simula el mando de una videoconsola. A través de dicha aplicación se puede controlar el movimiento del robot, capturar imágenes del entorno mediante la cámara ESP32-CAM y poner en marcha la navegación autónoma.

```
String device_name = "ESP32-BT"; // NOMBRE DEL MODULO BLUETOOTH

// PROBAMOS SI EL BLUETOOTH ESTÁ DISPONIBLE
#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) || !defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED)
#error Bluetooth is not enabled! Please run `make menuconfig` to and enable it
#endif

// Check Serial Port Profile
#if !defined(CONFIG_BT_SPP_ENABLED)
#error Serial Port Profile for Bluetooth is not available or not enabled. It is only available for the ESP32 chip.
#endif

BluetoothSerial SerialBT;

volatile bool movingForward = false;
volatile bool movingBackward = false;
volatile bool movingLeft = false;
volatile bool movingRight = false;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  SerialBT.begin(device_name); // INICIALIZA LA CONEXION BLUETOOTH
  // SerialBT.deleteAllBondedDevices(); // Uncomment this to delete paired devices; Must be called after begin
  Serial.printf("The device with name \"%s\" is started.\nNow you can pair it with Bluetooth!\n", device_name.c_str());
}
```

Figura 6.2.3 Programación del control por Bluetooth



Para una mejor interpretación se ha elaborado un flujograma sencillo con el procedimiento que realiza el código de manera simplificada:

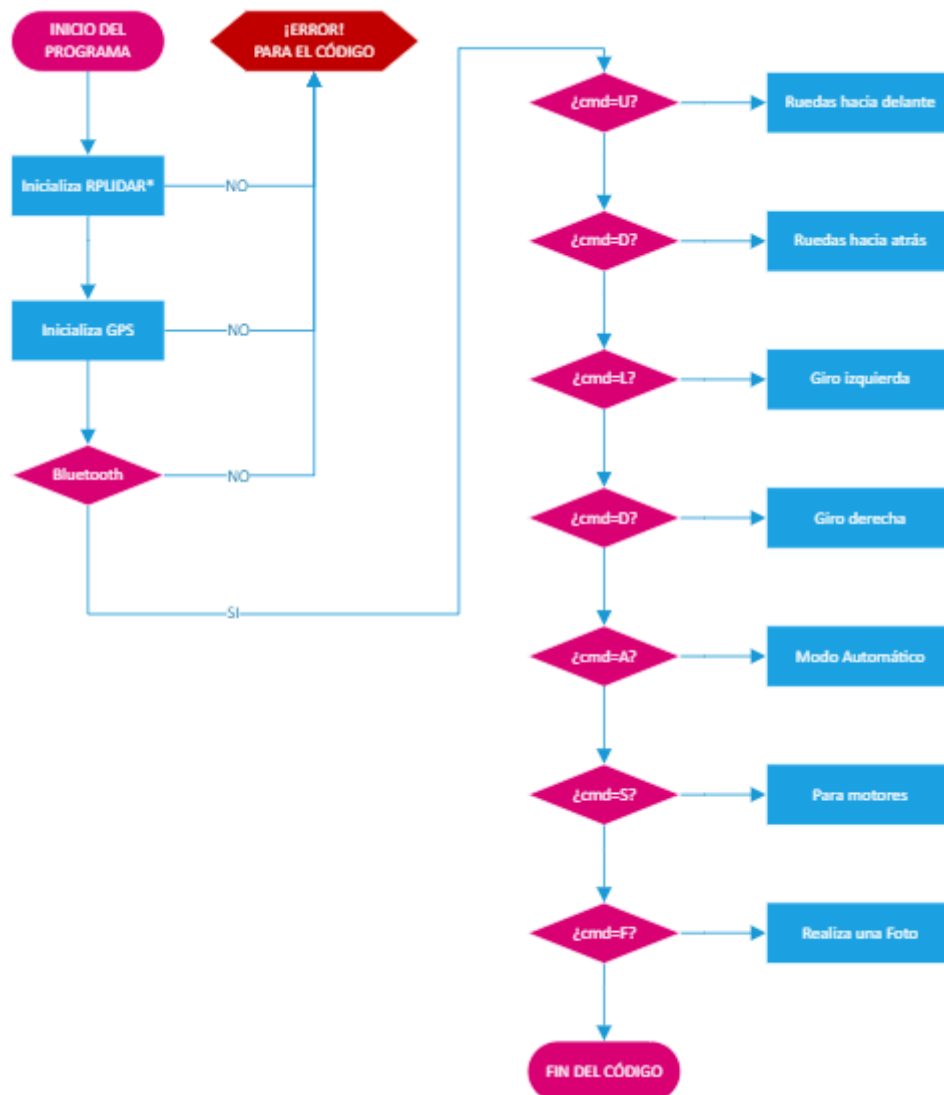


Figura 6.2.4 Flujograma del código

En la inicialización del sensor RPLIDAR se llevan a cabo una serie de tareas con el fin de proteger la integridad del sensor. Estas vienen definidas en la librería usada en la programación. A pesar de que no están incluidas en el código es necesario conocerlas para saber identificar dónde se producen los errores en los casos en los que el programa falla. Todas estas vienen explicadas en el siguiente flujograma:

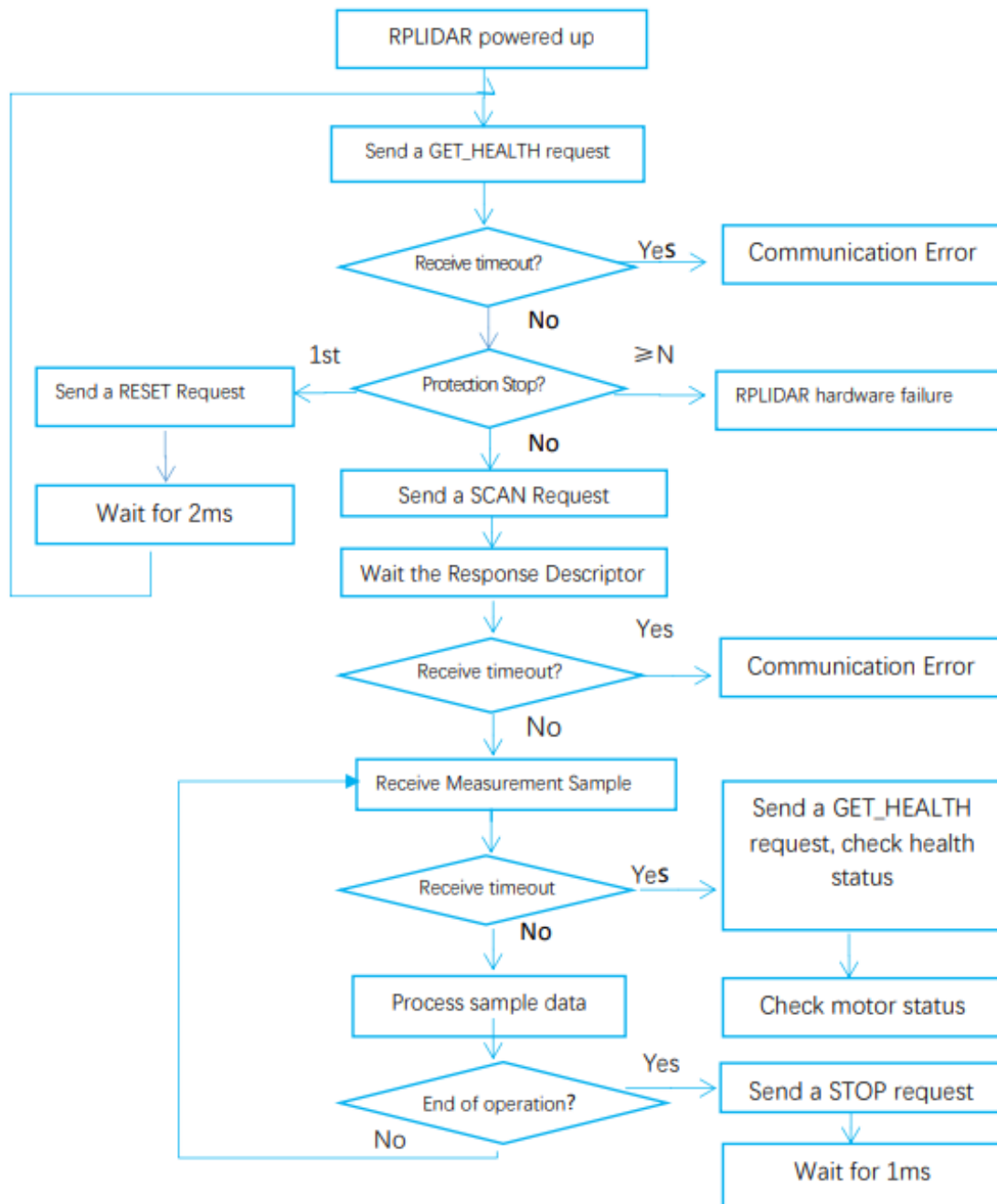


Figura 6.2.5 Proceso de obtención de datos en el RPLIDAR (Fuente:[17])

Antes de enviar la solicitud del escaneo de los datos obliga a pedir una actualización del estado de salud del sensor con el fin de evitar causar daños en el caso de que este fallando alguna cosa. Después del envío de cualquier solicitud se establece un tiempo máximo de espera para la respuesta. En el caso de no recibir ninguna respuesta por parte del sensor el programa muestra un mensaje de error y solicita de nuevo el estado de salud del sensor LiDAR y del motor.

### 6.3 DIAGRAMA CIRCUITAL

A través de la herramienta Eagle con la que se trabajó en el segundo curso del grado se ha elaborado un diagrama esquemático para representar el esquema eléctrico. En este queda definido cada uno de los dispositivos y todas las conexiones entre ellos.

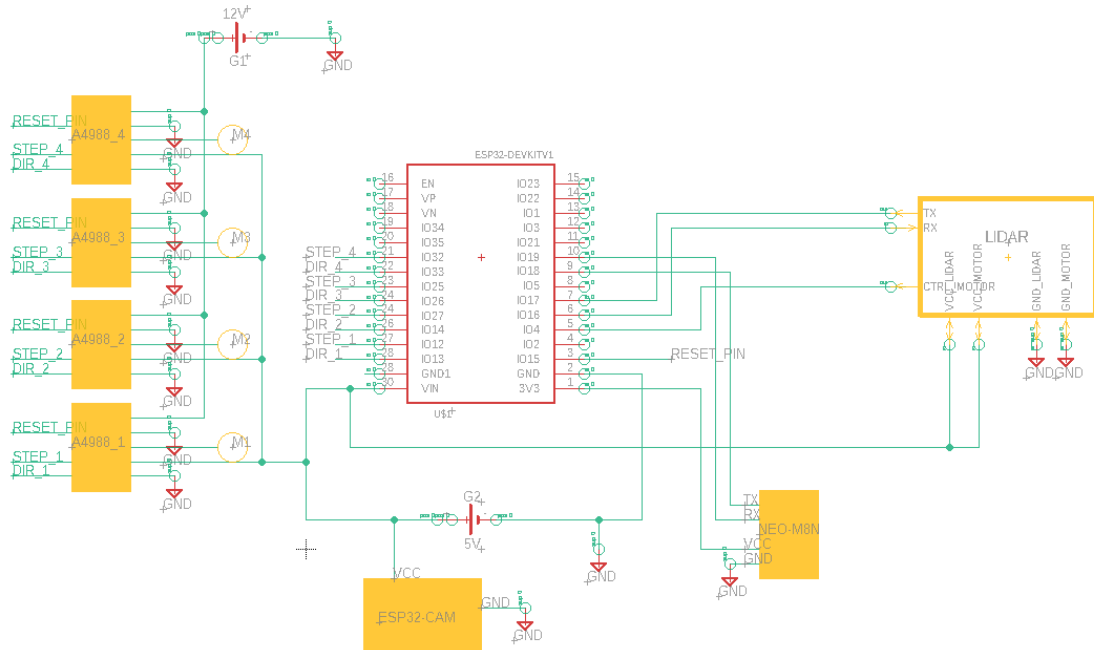



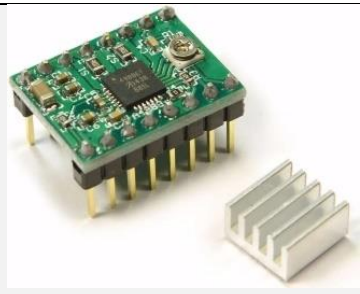

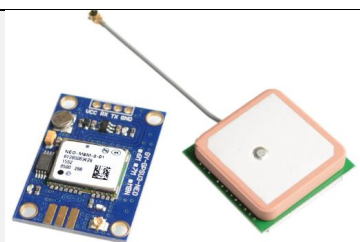

Figura 6.3.1 Diagrama del circuito






## 7. PRESUPUESTO

En esta sección se detallará el precio de cada componente usado para el desarrollo del robot en una tabla para facilitar su comprensión.

*Tabla 7.1 Evaluación del presupuesto*

Descripción	Cantidad	Imagen	Precio (€)
Microcontrolador ESP-WROOM-32/D	2		11
Driver A4988	4		4.88
ESP32-CAM	1		7.24
Módulo GPS NEO M8N	1		9.32
RPLiDAR A1M8	1		99.56

Descripción	Cantidad	Imagen	Precio (€)
Motor Nema 17	4		67.76
Batería recargable 12V	1		10.13
Batería portátil 10000 mAh	1		20
Ruedas 12 cm	4		21.51
Acopladores para motor nema	4		4.95

Descripción	Cantidad	Imagen	Precio (€)
Escuadras ángulo acero	16		7.42
Tubo cuadrado aluminio	3 m		8.67
Lámina de polietileno	1		—
Kit de 20 tornillos	1		2.79
Soporte para motores	4		—
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>			<b>275.23</b>

El presupuesto final sin incluir la mano de obra es inferior a los 300 €, un valor muy positivo ya que es muy inferior al límite que se estableció como objetivo antes de comenzar con la compra de los materiales.

Las evaluaciones pertinentes han de hacerse considerando el bajo coste que ha requerido la construcción del robot. Es evidente que existen una gama superior de sensores LiDAR y motores de corriente continua que aportarían una mayor precisión en los resultados. Sin embargo, el presente Trabajo de Fin de Grado ha buscado desde el comienzo obtener los resultados más rentables posibles.

Jorge Ortega Camazón

## 8. TEMPORALIZACIÓN DEL PROYECTO

Al comienzo del proyecto se establecieron las tareas en las que se compondría el Trabajo de Fin de Grado con el fin de proceder a su desarrollo de manera ordenada. Este apartado pretende explicar cada una de estas tareas y ubicarlas en los meses que ha durado la realización del proyecto.

- **Elección del tema:** Esta elección se realizó al comienzo del año tras hablar en varias ocasiones con diferentes tutores.
- **Selección de componentes:** Durante el primer mes se comenzó a estudiar los componentes necesarios para construir el robot.
- **Compra y adquisición de materiales:** Esta comprende la actividad de comparar los precios de los materiales y componentes que se han utilizado en diferentes tiendas tanto físicas como en línea y su posterior compra.
- **Redacción de la memoria:** La redacción de la memoria se realizó de manera progresiva hasta el mes de Julio.
- **Redacción del estado del arte:** Antes de tener posesión de todos los materiales se comenzó a investigar sobre los AMRs y se redactó el estado del arte.
- **Diseño de la estructura:** Se utilizó aproximadamente dos días para elaborar un diseño resistente y ligero del chasis del robot.
- **Montaje del chasis:** Para ello se trabajó en el laboratorio de herramientas de la universidad donde se manipularon los materiales para dar forma a la estructura diseñada.
- **Estudio de mercado:** Investigación de los robots preexistentes con funcionalidades similares al robot desarrollado en el presente trabajo.
- **Programación:** Esta actividad se realizó durante el último mes. Se elaboró un código individual para cada sensor utilizado con el objetivo de simplificar la actividad y finalmente se fusionaron todos los programas.
- **Evaluación del prototipo:** Realización de pruebas para evaluar el grado de satisfacción y cumplimiento de los objetivos inicialmente establecidos.

En el siguiente diagrama de Gantt se muestran todas las tareas además de una línea de tiempo en la que queda representada el tiempo requerido por cada una de ellas y el orden de realización.



Figura 8.1 Diagrama de Gantt parte 1

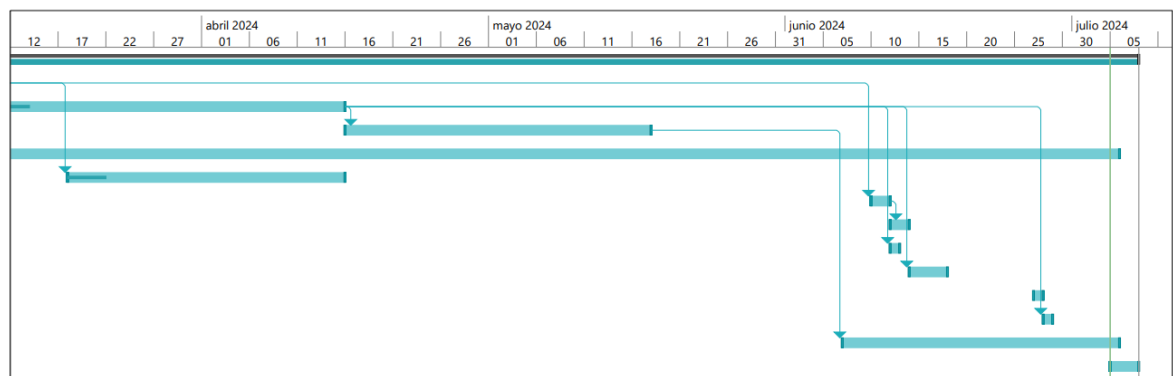


Figura 8.2 Diagrama de Gantt parte 2

## 9. POSIBLES MEJORAS

La robótica es una rama de la electrónica que siempre está abierta a los avances. Un proyecto de esta envergadura tiene un gran margen de mejora. Como posibles evoluciones para ampliar este proyecto se plantean las siguientes ideas:

- Implementación de una cámara de visión de profundidad. Existen varios modelos bastante económicos en el mercado que facilitarían el reconocimiento de objetos y a su vez permitirían la elaboración de mapas 3D.
- Optimización del diseño del chasis. Considero que se ha simplificado mucho la estructura del robot para minimizar el coste al máximo. Un buen avance sería la elaboración de un chasis más complejo que posea un mayor espacio para el transporte de cargas y facilite la incorporación de los sensores y actuadores sin perder la durabilidad.
- Incorporación de un sistema de suspensión. Dicho sistema permite al robot desenvolverse mejor en terrenos irregulares y reduce los esfuerzos que realizan los elementos motrices.
- Sustitución de las baterías por otras con mayor capacidad. Este cambio tendría un gran impacto en la vida del robot aportando una mayor autonomía. Sin embargo es muy probable que el peso y el coste del robot crezca bastante con este cambio.
- Desarrollo de una estación de carga. De esta manera se ahorraría tiempo y la necesidad de estar pendiente del nivel de las baterías ya que el robot podría recargar sus baterías de forma autosuficiente.
- Implementación de algoritmos de inteligencia artificial. Esta última evolución requiere bastante trabajo pero mejoraría considerablemente la funcionalidad del robot permitiendo el aprendizaje automático y una mejor toma de decisiones.

## 10. CONCLUSIONES

El diseño, construcción y programación de un robot móvil autónomo de bajo coste ha terminado siendo un gran desafío. Para satisfacer todos los objetivos planteados al inicio del desarrollo se requieren buenos conocimientos en áreas muy diversas como la electrónica de control, la mecánica y la programación siendo esta última una actividad clave que ha requerido más tiempo de lo previsto.

Tras una serie de evaluaciones en las que se ha examinado la funcionalidad de cada dispositivo por separado y también en su conjunto, se han obtenido resultados muy positivos. El robot es capaz de escanear las distancias de los objetos a su alrededor de manera aceptable. La navegación por control remoto funciona a la perfección y en su versión autónoma se desenvuelve de manera notable.

Además, la versatilidad del robot ha sorprendido positivamente ya que con la elección de los motores y los neumáticos se ha conseguido un correcto funcionamiento también en exteriores donde además se utiliza la información del sensor GPS.

Uno de los objetivos en los que se ha obtenido una mayor satisfacción con el resultado final es la implementación *"low cost"*. A lo largo de esta memoria se ha demostrado con claridad que es posible desarrollar un robot móvil multifuncional a un precio relativamente barato. En un principio se estableció como objetivo no superar los 500 € de presupuesto en material, es decir, sin contar con el valor de la mano de obra. El resultado final ha sido la integración de todos los controladores, sensores y actuadores en un chasis muy robusto por menos de 300 €.

Por otra parte el sensor LiDAR ha dado desde el comienzo de su programación muchos problemas. El proceso para inicializar el escaneo de datos haciendo mover su motor de pasos ha generado una gran cantidad de errores. Gran parte de ellos debido a la incompatibilidad de las librerías que la empresa desarrolladora del sensor aporta de manera gratuita con los microcontroladores ESP32. A consecuencia de esto se ha demorado demasiado el desarrollo del algoritmo de navegación. No obstante los resultados finales obtenidos son satisfactorios. El robot es capaz de realizar las actividades planteadas al inicio de

la memoria con una efectividad destacable siendo conocedor del bajo coste de producción.

Sin embargo, hay algunos aspectos que no han sido tan buenos. La gestión de la energía y la duración de la batería ha sido una faceta que no recibió la consideración adecuada, el tiempo de operación del robot ha acabado siendo bastante reducido y ha requerido varios ajustes a lo largo del proyecto.

Otra faceta que no fue considerada fue el valor estético del robot. El diseño actual, a pesar de ser perfectamente funcional es muy básico. Un enfoque más sofisticado y refinado permitiría un uso del espacio más eficiente y lo acercaría más al mercado.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha llegado a la conclusión de que este prototipo ofrece una solución muy rentable en comparación con los robots de estas características en el mercado. Sus resultados son muy notables y posee un gran margen de mejora. El proyecto queda abierto a futuras ampliaciones y con la implementación de las mejoras propuestas estoy convencido de que se convertiría en un robot muy competente en el mercado.



## **11. AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a las personas que han contribuido al desarrollo de este proyecto.

En especial a mis dos tutores que me han orientado y apoyado durante el trascurso de todo el proyecto. Sus conocimientos y sugerencias han resultado vitales para la realización del trabajo y han estado siempre dispuestos a ayudarme en la medida de lo posible.

Agradezco también a mis compañeros y mi familia que han aportado tanto directa como indirectamente mucho. Su apoyo ha sido esencial para mantenerme motivado y poder terminar este trabajo a tiempo.

Finalmente quiero dar las gracias a Juan, David y Rodrigo. Tres grandes amigos que me ayudaron a encontrar soluciones para sacar el proyecto adelante cuando me había quedado estancado.

A todos ellos, muchísimas gracias.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alejandro Polanco Masa, “Elmer y Elsie, las tortugas robot de 1948.”
- [2] University of Bristol, “Grey Walter and his tortoises,” 2008, Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.bristol.ac.uk/news/2008/212017945378.html>
- [3] SRI International, “Shakey the robot,” 1984.
- [4] SRI, “75 Years of Innovation: Shakey the Robot,” 2021. Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.sri.com/press/story/75-years-of-innovation-shakey-the-robot/>
- [5] H. P. Moravec, “The Stanford Cart and the CMU Rover,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, no. 7, 1983, doi: 10.1109/PROC.1983.12684.
- [6] Stanford University, “The Stanford Cart”, Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://news.stanford.edu/stories/2019/01/stanfords-robotics-legacy>
- [7] Cybernet-1, “1982 – RB5X THE INTELLIGENT ROBOT – JOSEPH BOSWORTH .”
- [8] Stuart Atkinson, “Sojourner: NASA’s first Mars rover,” *Astronomy*, Jul. 04, 2023.
- [9] NASA, “Sojourner Rover.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/resource/sojourner-rover/>
- [10] Marisa Martínez Jiménez, “La evolución del low-cost (I): moda, tendencia o realidad consolidada,” in *12 contribuciones al liderazgo en 2018*. Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/la-evoluci%C3%B3n-del-low-cost-i-moda-tendencia-o-realidad-marisa>
- [11] Robotnik, “ROBOT MÓVIL RB-SUMMIT.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/rb-summit/>

- [12] Robotnik, "ROBOT MÓVIL RB-WATCHER." Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/rb-watcher/>
- [13] Aliexpress, "ROBOMASTER X3 ROS2." Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005004322606862.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.376eSCtUSCtUyN&algo\\_pvid=bcbc346b-e5e2-4625-a4e3-549a75929dca&algo\\_exp\\_id=bcbc346b-e5e2-4625-a4e3-549a75929dca-0&pdp\\_npi=4%40dis%21EUR%211050.93%21735.65%21%21%211107.76%21775.43%21%40211b664d17201135421853181ed297%2112000028757293793%21sea%21ES%212762944261%21&curPageLogUid=mJC80bvXcb sY&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery\\_from%3A](https://es.aliexpress.com/item/1005004322606862.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.376eSCtUSCtUyN&algo_pvid=bcbc346b-e5e2-4625-a4e3-549a75929dca&algo_exp_id=bcbc346b-e5e2-4625-a4e3-549a75929dca-0&pdp_npi=4%40dis%21EUR%211050.93%21735.65%21%21%211107.76%21775.43%21%40211b664d17201135421853181ed297%2112000028757293793%21sea%21ES%212762944261%21&curPageLogUid=mJC80bvXcb sY&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A)
- [14] Espressif Systems, "ESP32WROOM32 Datasheet," 2023. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
- [15] Thetorics PCB, "ESP32 30 Pines USB-C." Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://rhetoricspcb.com/products/esp32-30-pines-usb-c-ch340-nodemcu-wifi-bluetooth-tipo-c>
- [16] SLAMTEC, "SLAMTEC RPLIDAR A1M8 Datasheet," 2020.
- [17] SLAMTEC, "RPLIDAR A1." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://image.slamtec.com/images/a1/phone-summary-section2-en.jpg>
- [18] SLAMTEC, "Interface Protocol and Application Notes Applied to RPLIDAR A and S Series," 2009. [Online]. Available: [https://github.com/slamtec/rplidar\\_sdk](https://github.com/slamtec/rplidar_sdk)
- [19] Ai-Thinker, "ESP32-CAM Wi-Fi+BT SoC Module," 2017.
- [20] Espressif Systems, "ESP32-CAM." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: [espressif.com/en/products](https://espressif.com/en/products)
- [21] Mactronica, "MODULO GPS NEO M8N." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.mactronica.com.co/modulo-gps-neo-m8n>
- [22] PIC, "Operation principle of stepper motor." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: [http://www.piclist.com/images/www/hobby\\_elec/e\\_step1.htm](http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/e_step1.htm)

- [23] Amazon, "Akozon Acoplamiento M4 ." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: [https://www.amazon.es/Akozon-Acoplamiento-Acopladore-impresora-Innendurchmesser/dp/B07MH5RQDK/ref=sr\\_1\\_19?\\_\\_mk\\_es\\_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=3OPE7C7C30Q8H&dib=eyJ2ljoIMSJ9.lle\\_VVbTg\\_ak7a2CoJma-DdhQJaSXZRSw03eyKW7gNxTWkv-O27SUGZYkBx39at9J5H-t9KR2Q1Op6etySYCRmc2SNjhP6hvC9D9VRfiO4zX3Udu6Fn8DYHuwGTxwkgly3kp7uaU2fc39Q0TjEZI-wlQ7oSCs0SUVICEQUu180LKJ9YU9JUuIMDcn\\_8NLKuuM4ZiCiDIKejWvkW06P7RVg-DVRDGpaj7BsaHQagjH4jfDO3zhMsYnrlxiH8zVeE45IP4tDKEED4MIYiR1OQi1dPVx\\_6Wv3JBduZfCMr1ktY.9vgZPUQJBWO-s7MBw9wNeXyaFlpsyap1rdqCUI-Dnbo&dib\\_tag=se&keywords=acoplador%2B5mm%2Ba%2B4mm%2Bmotor%2Bnema&qid=1719312539&sprefix=acoplador%2B5mm%2Ba%2B4mm%2Bmotor%2Bnema%2Caps%2C84&sr=8-19&th=1](https://www.amazon.es/Akozon-Acoplamiento-Acopladore-impresora-Innendurchmesser/dp/B07MH5RQDK/ref=sr_1_19?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=3OPE7C7C30Q8H&dib=eyJ2ljoIMSJ9.lle_VVbTg_ak7a2CoJma-DdhQJaSXZRSw03eyKW7gNxTWkv-O27SUGZYkBx39at9J5H-t9KR2Q1Op6etySYCRmc2SNjhP6hvC9D9VRfiO4zX3Udu6Fn8DYHuwGTxwkgly3kp7uaU2fc39Q0TjEZI-wlQ7oSCs0SUVICEQUu180LKJ9YU9JUuIMDcn_8NLKuuM4ZiCiDIKejWvkW06P7RVg-DVRDGpaj7BsaHQagjH4jfDO3zhMsYnrlxiH8zVeE45IP4tDKEED4MIYiR1OQi1dPVx_6Wv3JBduZfCMr1ktY.9vgZPUQJBWO-s7MBw9wNeXyaFlpsyap1rdqCUI-Dnbo&dib_tag=se&keywords=acoplador%2B5mm%2Ba%2B4mm%2Bmotor%2Bnema&qid=1719312539&sprefix=acoplador%2B5mm%2Ba%2B4mm%2Bmotor%2Bnema%2Caps%2C84&sr=8-19&th=1)
- [24] Amazon, "STEPPERONLINE Nema 17 Motor paso a paso Bipolar." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: [https://www.amazon.es/Stepper-Bipolar-4-lead-Printer-STEPPERONLINE/dp/B00PNEQKC0/ref=sr\\_1\\_7?dib=eyJ2ljoIMSJ9.gT3o0FsLtSz23nFDLFRnWCDhAb0r7sU1vkfM\\_rA4AlIVbdb\\_ZzZxJbcwwXNrb5\\_ieAb2WME8Yf6enQ9Y0e6je\\_sXFXwQ-iHv01d-2N8k6UqMZ5d-ed5hwYNITeYZ77diViA3vriiJqHcjIDUp8zZO8RFnGau8Hiley9v5nrkou6FR0fTchnLwDHNriBF6En0QZGYHV8fsGvs8xG1GqaGgl\\_Qg0WIPQzfcus-88Od53lVy-uPijNLsa4u4m5umMO-KnTbEm0RJ6pzdNS\\_-okFwH2NZZdgDFeSy1EWzM6dl.1Amd\\_ColdMkts3mltgwdcNaqhcPpygZn-L-buc\\_Jq-l&dib\\_tag=se&keywords=nema+17+stepper+motor&qid=1719764570&sr=8-7](https://www.amazon.es/Stepper-Bipolar-4-lead-Printer-STEPPERONLINE/dp/B00PNEQKC0/ref=sr_1_7?dib=eyJ2ljoIMSJ9.gT3o0FsLtSz23nFDLFRnWCDhAb0r7sU1vkfM_rA4AlIVbdb_ZzZxJbcwwXNrb5_ieAb2WME8Yf6enQ9Y0e6je_sXFXwQ-iHv01d-2N8k6UqMZ5d-ed5hwYNITeYZ77diViA3vriiJqHcjIDUp8zZO8RFnGau8Hiley9v5nrkou6FR0fTchnLwDHNriBF6En0QZGYHV8fsGvs8xG1GqaGgl_Qg0WIPQzfcus-88Od53lVy-uPijNLsa4u4m5umMO-KnTbEm0RJ6pzdNS_-okFwH2NZZdgDFeSy1EWzM6dl.1Amd_ColdMkts3mltgwdcNaqhcPpygZn-L-buc_Jq-l&dib_tag=se&keywords=nema+17+stepper+motor&qid=1719764570&sr=8-7)
- [25] Allegro, "A4988 DMOS Microstepping Driver," 2014. [Online]. Available: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)

- [26] Aliexpress, "Batería protectora de carga de 12V CC, 3000mAh." Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005006461294320.html?srcSns=sns\\_WhatsApp&spreadType=socialShare&bizType=ProductDetail&social\\_params=60695001838&aff\\_fcid=16899279d08340a68db18427bd1ff8b2-1720122628013-04701-\\_EJLgYZV&tt=MG&aff\\_fsk=\\_EJLgYZV&aff\\_platform=default&sk=\\_EJLgYZV&aff\\_trace\\_key=16899279d08340a68db18427bd1ff8b2-1720122628013-04701-\\_EJLgYZV&shareId=60695001838&businessType=ProductDetail&platform=AE&terminal\\_id=755f31c57c014eb08e3c7edd21af0443&afSmartRedirect=y](https://es.aliexpress.com/item/1005006461294320.html?srcSns=sns_WhatsApp&spreadType=socialShare&bizType=ProductDetail&social_params=60695001838&aff_fcid=16899279d08340a68db18427bd1ff8b2-1720122628013-04701-_EJLgYZV&tt=MG&aff_fsk=_EJLgYZV&aff_platform=default&sk=_EJLgYZV&aff_trace_key=16899279d08340a68db18427bd1ff8b2-1720122628013-04701-_EJLgYZV&shareId=60695001838&businessType=ProductDetail&platform=AE&terminal_id=755f31c57c014eb08e3c7edd21af0443&afSmartRedirect=y)
- [27] Cellularline, "Power Bank ESSENCE 10000." Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.cellularline.com/es-es/Alimentaci%C3%B3n-y-Soportes/Bater%C3%ADas-Externa/Power-Bank-ESSENCE-10000/p/PBESSENCE10000K>
- [28] "UNE-EN ISO 13482," 2014. [Online]. Available: [www.aenor.es](http://www.aenor.es)