



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un
UGV (Unmanned Ground Vehicle) de apoyo a las Pequeñas
Unidades de Infantería de Marina*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Miguel Martín Rojas

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

TCOL Aitor Carlos Nieto Iglesias

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un
UGV (Unmanned Ground Vehicle) de apoyo a las Pequeñas
Unidades de Infantería de Marina*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

En la actualidad, los vehículos terrestres no tripulados representan una línea de interés creciente en el ámbito militar, especialmente por su capacidad para reducir la exposición del personal y ampliar las posibilidades de reconocimiento y apoyo en pequeñas unidades. En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Grado se centra en la adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a una plataforma tipo UGV, tomando como base un sistema comercial de bajo coste y transformándolo en un prototipo con mayores posibilidades de control, configuración y ampliación. Para ello, se parte del análisis de la configuración original del vehículo y se desarrolla una nueva arquitectura basada en Pixhawk 2.4.8 y ArduRover, junto con la integración de una nueva electrónica de control y distintos elementos auxiliares. De forma complementaria, se realiza el modelado CAD completo del vehículo en Autodesk Inventor, incluyendo la reconstrucción geométrica de sus elementos principales y el diseño de nuevas piezas de integración. Finalmente, se incorpora una capacidad FPV basada en Raspberry Pi 4B y cámara USB, con retransmisión remota de vídeo a un dispositivo móvil. El resultado obtenido permite validar la viabilidad del conjunto como prototipo funcional de apoyo para tareas básicas de reconocimiento y vigilancia.

PALABRAS CLAVE

UGV, Pixhawk, ArduRover, FPV, Autodesk Inventor

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis tutores por su dedicación, su cercanía y su disponibilidad constante siempre que los he necesitado. Su manera de entender el trabajo, su entusiasmo y su implicación han sido una inspiración durante todo este proceso, y han conseguido transmitir una motivación que ha terminado formando parte de este proyecto.

A mi familia, por ser siempre el apoyo que nunca falla. Por estar ahí en cada etapa, en los momentos buenos y en los más difíciles, por confiar en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por sostenerme con su cariño, su paciencia y su ejemplo. Nada de esto tendría el mismo valor sin ellos.

A la promoción 156 del Glorioso Cuerpo de Infantería de Marina, por estos cinco años de Escuela, de esfuerzo compartido, aprendizaje y vivencias que quedarán para siempre en la memoria.

Y, por último, a la camareta 201, por todo lo vivido este año. Sin ellos, esta etapa no habría sido ni la mitad de especial.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Descripción del apartado.....	8
1.2 Antecedentes	8
1.3 Motivación	9
1.4 Objetivos	9
1.5 Estructura del trabajo	10
2 Estado del arte	11
2.1 Descripción del apartado.....	11
2.2 Vehículos terrestres no tripulados (UGV)	11
2.2.1 Origen y evolución histórica.....	12
2.2.2 Clasificación y tipología	16
2.2.3 Aplicaciones militares y contexto actual en el ámbito nacional	19
2.2.4 Ventajas y limitaciones en escenarios reales	21
2.3 Configuración técnica de un UGV	22
2.3.1 Plataforma móvil y locomoción.....	22
2.3.2 Sistemas de control y comunicaciones	23
2.4 Herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD)	24
2.4.1 Diseño digital	24
2.4.2 Diseño CAD del UGV	25
3 Desarrollo del TFG.....	26
3.1 Descripción del apartado.....	26
3.2 Estudio previo	26
3.2.1 Elección del modelo base	27
3.2.2 Elementos principales de un UGV	28
3.3 Análisis de la configuración original del vehículo.....	29
3.3.1 Descripción general del vehículo de serie	29
3.3.2 Arquitectura mecánica y disposición interna del vehículo original.....	30
3.3.3 Arquitectura electrónica original	33
3.3.4 Prestaciones y limitaciones de la configuración de serie.....	35
3.4 Propuesta de UGV	37

3.4.1 Requisitos funcionales y operativos	37
3.4.2 Arquitectura del sistema propuesto	37
3.4.3 Comparativa entre configuración original y configuración propuesta	38
3.5 Modelado CAD del vehículo	39
3.5.1 Criterios generales	39
3.5.2 Toma de medidas y reconstrucción geométrica.....	40
3.5.3 Piezas diseñadas en Autodesk Inventor	40
3.5.4 Ensamblaje, restricciones y rangos de movimiento.....	51
3.5.5 Renderizado del conjunto final	55
3.6 Reconfiguración del sistema electrónico e integración con Pixhawk (ArduRover)	56
3.6.1 Análisis de la electrónica de serie.....	56
3.6.2 Análisis de la electrónica propuesta	57
3.6.3 Configuración en Mission Planner	60
3.6.4 Integración y configuración de servos auxiliares para el control de cámara	65
3.7 Integración y configuración de la Raspberry Pi 4B para el sistema FPV	70
3.7.1 Preparación del sistema operativo de la Raspberry Pi 4B	70
3.7.2 Configuración inicial y acceso al sistema.....	71
3.7.3 Conexión a red y acceso remoto	72
3.7.4 Conexión y reconocimiento de la cámara USB.....	72
3.7.5 Configuración de la retransmisión de vídeo mediante VLC	73
3.7.6 Ajuste del sistema y reducción de latencia	74
3.7.7 Automatización del arranque del sistema FPV.....	74
3.7.8 Asignación de dirección IP fija.....	75
4 Resultados	76
4.1 Descripción del apartado.....	76
4.2 Resultado del modelado CAD.....	76
4.2.1 Planimetría.....	76
4.3 Comparación entre el vehículo de serie y el prototipo modificado	77
4.4 Resultados del ensamblaje y de la integración física.....	79
4.5 Ensayo de movilidad básica en interior	80
4.6 Ensayo de desplazamiento sobre distintos escenarios	81
4.7 Resultados del sistema de orientación de cámara	84
4.8 Resultados de la configuración y validación en Mission Planner.....	85
4.9 Resultados del armado desde la emisora.....	86
4.10 Valoración del empleo de un UGV en operaciones militares.....	86
4.10.1 Operaciones ofensivas	86

4.10.2 Operaciones defensivas	87
4.10.3 Patrullas	88
4.10.4 Operaciones militares en terreno urbanizado (MOUT)	89
5 Conclusiones y líneas futuras	91
5.1 Descripción del apartado.....	91
5.2 Conclusiones	91
5.3 Limitaciones.....	92
5.4 Líneas futuras	92
6 Bibliografía.....	95
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	98
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	100
Anexo III: uso de IA.....	101
Anexo IV: planimetría.....	102
.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Tipos de UGV [Autoría propia uso de IA]	11
Figura 2-2 Sistema Telekino [4].....	12
Figura 2-3 Torpedo terrestre Aubriot-Gabet [7].....	13
Figura 2-4 Teletanque soviético TT-26 [9]	13
Figura 2-5 Vehículo alemán Goliath [12]	14
Figura 2-6 Robot móvil Shakey [14].....	14
Figura 2-7 Autonomous Land Vehicle (ALV) [15]	15
Figura 2-8 Robot EOD PackBot [16]	15
Figura 2-9 Sistema SWORDS [18]	16
Figura 2-10 UGV THeMIS del Ejército de Tierra [23].....	19
Figura 2-11 UGV Valkyrie [25].....	20
Figura 2-12 UGV TerMIT [27].....	20
Figura 2-13 UGV Wild Goose [28].....	21
Figura 3-1 Fases del proyecto [Autoría propia uso de IA].....	26
Figura 3-2 Plataformas comerciales [38]	27
Figura 3-3 JJRC C8812 EV2.....	30
Figura 3-4 Vista de perfil del vehículo.....	30
Figura 3-5 Ruedas delanteras tensoras	31
Figura 3-6 Caja de transmisión	31
Figura 3-7 Parte superior del chasis	32
Figura 3-8 Alojamiento de la batería en el chasis	32
Figura 3-9 Alojamiento de la electrónica en el chasis.....	33
Figura 3-10 Placa electrónica	34
Figura 3-11 Radiocontrol del vehículo.....	34
Figura 3-12 Motores DC del sistema de tracción del vehículo	35
Figura 3-13 Proceso de reconstrucción del chasis: (izquierda) chasis original del vehículo, (centro) geometría obtenida mediante escaneo como referencia, y (derecha) modelo final reconstruido en Autodesk Inventor.....	40
Figura 3-14 Rueda conducida superior: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD	41
Figura 3-15 Rueda conducida inferior: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD	41
Figura 3-16 Rueda motriz: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD.....	42
Figura 3-17 Rueda tensora: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD.....	42
Figura 3-18 Correa: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD.....	43

Figura 3-19 Conjunto de amortiguación de rueda conducida inferior	43
Figura 3-20 Vistas del chasis inferior modelado en Autodesk Inventor	44
Figura 3-21 Caja de transmisión	45
Figura 3-22 Plataforma base.....	46
Figura 3-23 Plataforma de la segunda planta	47
Figura 3-24 Pixhawk 2.4.8	48
Figura 3-25 Raspberry Pi 4B.....	48
Figura 3-26 Receptor FS-IA6B	49
Figura 3-27 GPS.....	49
Figura 3-28 Plataforma base-pixhawk-batería	50
Figura 3-29 Integración de los componentes en la segunda planta.....	50
Figura 3-30 Integración conjunta de ambas plataformas	51
Figura 3-31 Ensamblaje amortiguación-rueda	52
Figura 3-32 Ensamblaje sistema de tracción.....	52
Figura 3-33 Ensamblaje sistema de tracción-chasis.....	53
Figura 3-34 Ensamblaje chasis-transmisión.....	53
Figura 3-35 Ensamblaje entre chasis-arduino nano-cytron.....	53
Figura 3-36 Integración componentes-plataforma base	54
Figura 3-37 Ensamblaje plataforma 2ª planta-plataforma base.....	54
Figura 3-38 Integración componentes con plataformas	55
Figura 3-39 Grado de movimiento de las ruedas inferiores	55
Figura 3-40 Renderizado del UGV	56
Figura 3-41 Pixhawk 2.4.8 [autoría propia uso de IA].....	58
Figura 3-42 Cytron MDD3A [autoría propia uso de IA]	59
Figura 3-43 Arduino Nano [autoría propia uso de IA].....	59
Figura 3-44 Pantalla principal de Mission Planner con autopiloto conectado	60
Figura 3-45 Selección del tipo de vehículo [38]	61
Figura 3-46 Frame type	61
Figura 3-47 Calibración de la pixhawk	62
Figura 3-48 Calibración de canales RC.....	62
Figura 3-49 Configuración de modos de operación	63
Figura 3-50 Asignación de funciones a salidas	63
Figura 3-51 Configuración de seguridad del sistema.....	64
Figura 3-52 Verificación de salidas mediante Motor Test	64
Figura 3-53 Registro de parámetros	65

Figura 3-54 BEC	65
Figura 3-55 Configuración de los canales para los servos	67
Figura 3-56 Verificación del canal 7 en la pantalla Radio Calibration	69
Figura 3-57 Configuración del parámetro RC7_OPTION = 153	69
Figura 3-58 Armado y desarmado desde el emisor	70
Figura 3-59 Instalación de la imagen en la SD	71
Figura 3-60 Interfaz	71
Figura 3-61 Conectividad Wifi y dirección IP	72
Figura 3-62 Detección de la cámara USB y comprobación de los nodos de vídeo	73
Figura 3-63 Visualización de VLC en dispositivo móvil	73
Figura 3-64 Ajuste de los parámetros de retransmisión para la reducción de latencia	74
Figura 3-65 Script y servicio de arranque automático del sistema FPV	75
Figura 3-66 Configuración de IP fija	75
Figura 4-1 Comparación del vehículo de serie y el configurado	79
Figura 4-2 Configuración de la electrónica	79
Figura 4-3 Ensayo de movilidad	81
Figura 4-4 Ensayo en la explanada	82
Figura 4-5 Ensayo en la pista militar	82
Figura 4-6 Ensayo en arena	83
Figura 4-7 Ensayo en la pista militar	83
Figura 4-8 Ensayo en el cuartel Marqués de la Victoria	84
Figura 4-9 Empleo de un UGV en una operación ofensiva [Autoría propia uso de IA]	87
Figura 4-10 Empleo de un UGV en una operación defensiva [Autoría propia uso de IA]	88
Figura 4-11 Empleo de un UGV en una patrulla [Autoría propia uso de IA]	89
Figura 4-12 Operaciones militares en terreno urbanizado (MOUT) [Autoría propia uso de IA]	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Clasificación de UGVs por autonomía	17
Tabla 2-2 Clasificación de UGVs por función y aplicación	18
Tabla 2-3 Clasificación de UGVs por tamaño	18
Tabla 2-4 Clasificación de UGVs por sistema de locomoción	19
Tabla 4-1 Planos del ensamblaje del UGV	77
Tabla 4-2 Planos del conjunto de tracción por orugas	77
Tabla 4-3 Planos del conjunto interior e integración	77

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Descripción del apartado

En este apartado se presenta el marco general en el que se desarrolla el Trabajo Fin de Grado, exponiendo el contexto tecnológico y operativo que justifica su realización, así como la motivación y los objetivos que se persiguen. Del mismo modo, se describe la estructura del documento y la organización de su contenido.

1.2 Antecedentes

La evolución tecnológica en el ámbito militar ha estado históricamente ligada al desarrollo de nuevas herramientas y sistemas orientados a mejorar la eficacia operativa, reducir la exposición del personal y optimizar el empleo de los recursos disponibles. En este proceso, la aparición y consolidación de los sistemas no tripulados ha supuesto un cambio significativo en la forma de planear y ejecutar determinadas misiones, especialmente aquellas que implican un elevado nivel de riesgo. Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) se han convertido, en este contexto, en una solución de interés para tareas como el reconocimiento o el apoyo táctico a pequeñas unidades.

Paralelamente al avance de estos sistemas, se ha producido un desarrollo notable de las tecnologías digitales aplicadas al diseño y análisis de productos de ingeniería. Las herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), junto con los procesos de visualización y simulación, permiten actualmente representar de forma precisa sistemas mecánicos complejos y estudiar su comportamiento sin necesidad de fabricar un prototipo físico en las fases iniciales del desarrollo. Este enfoque posibilita la realización de modificaciones, optimizaciones y evaluaciones técnicas de manera más eficiente, reduciendo tanto los costes como los tiempos asociados al proceso de diseño.

En el ámbito del diseño de vehículos y sistemas móviles, estas herramientas no se limitan únicamente a la representación geométrica, sino que permiten llevar a cabo estudios cinemáticos y de movimiento, analizar trayectorias, interferencias y rangos de funcionamiento, y evaluar de forma preliminar el comportamiento del sistema en condiciones similares a las de un entorno real. En el caso de los UGV, este tipo de análisis resulta especialmente relevante, ya que la movilidad, la maniobrabilidad y la adaptación al terreno constituyen factores determinantes para su empleo en escenarios militares.

El avance de la electrónica, los sistemas de control y los sensores, unido a la disponibilidad de plataformas comerciales, ha hecho posible que proyectos de bajo coste, basados en cuestiones civiles, puedan evolucionar hacia prototipos con prestaciones razonables para determinadas misiones militares. Esta tendencia ha favorecido enfoques de desarrollo más flexibles y accesibles, en los que no es necesario partir de un vehículo militar diseñado desde cero para estudiar y validar conceptos operativos y técnicos.

En esta línea se enmarca el presente trabajo, que no parte del diseño completo de un UGV militar, sino de la adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado con tracción por orugas, con el objetivo de transformarlo en un sistema funcional y justificable como *Small UGV* (SUGV) de apoyo a pequeñas unidades. Para ello, el trabajo se apoya en el uso de *Autodesk Inventor* como herramienta principal de diseño, mediante la cual se modela digitalmente el vehículo y se introducen las modificaciones necesarias para su adecuación a un entorno de empleo militar.

Una vez definido el modelo, se realizan los estudios cinemáticos correspondientes con el fin de analizar las características de movilidad y comportamiento del sistema, evaluando su aplicabilidad a misiones de apoyo táctico. De este modo, el proyecto se sitúa entre el desarrollo de sistemas no tripulados y el uso de herramientas avanzadas de diseño y simulación, aprovechando las capacidades actuales de visualización y análisis para estudiar un UGV sin necesidad de recurrir inicialmente a la fabricación de un prototipo físico.

1.3 Motivación

La motivación del presente Trabajo Fin de Grado se fundamenta en el interés por aplicar los conocimientos adquiridos durante la titulación a un proyecto práctico y realista, vinculado a un ámbito tecnológico de creciente relevancia como es el de los vehículos terrestres no tripulados. En particular, el trabajo permite abordar el diseño y análisis de un sistema móvil desde una perspectiva ingenieril, combinando diseño mecánico, simulación y fabricación.

Un factor especialmente motivador es que este proyecto se plantea como el primer Trabajo Fin de Grado, dentro de esta línea, centrado en la adaptación y aproximación a un *Small UGV*. Este carácter pionero supone una oportunidad para abrir camino en el desarrollo de propuestas de este tipo, estableciendo una base técnica y metodológica que pueda servir como referencia para futuros trabajos relacionados con plataformas terrestres no tripuladas.

Además, resulta motivador partir de una plataforma existente y someterla a un proceso de transformación y mejora, en lugar de desarrollar un sistema desde cero. Este planteamiento permite centrarse en la identificación de limitaciones reales del sistema original y en el diseño de soluciones técnicas orientadas a mejorar sus prestaciones, acercándolo conceptualmente a un *Small UGV*. De este modo, el proyecto se enfoca en la adaptación y optimización de un vehículo radiocontrolado mediante modificaciones estructurales y funcionales diseñadas específicamente para su nuevo propósito.

Por otro lado, la posibilidad de fabricar físicamente las piezas diseñadas mediante impresión 3D refuerza el carácter aplicado del proyecto, permitiendo comprobar la viabilidad de las soluciones propuestas y cerrar el ciclo completo de diseño–simulación–fabricación. La integración de mejoras como un sistema de visión mediante cámara y la reprogramación del control para obtener mayores prestaciones añade un componente adicional de interés, al permitir evaluar cómo estas modificaciones influyen en el comportamiento global del sistema.

En conjunto, la motivación del trabajo reside en desarrollar un proyecto que combine análisis técnico, diseño mecánico y experimentación práctica, aplicando herramientas actuales de ingeniería a un sistema real y alineado con un ámbito tecnológico de plena actualidad.

1.4 Objetivos

El presente trabajo tiene como finalidad el desarrollo de un proyecto de carácter técnico y aplicado, orientado al diseño, análisis y validación conceptual de un vehículo terrestre no tripulado a partir de una plataforma radiocontrolada existente. El objetivo general es desarrollar y justificar, a nivel técnico y de diseño, la adaptación de una plataforma todoterreno radiocontrolada con tracción por orugas para su

empleo como *Small UGV* (SUGV), orientado al apoyo de pequeñas unidades en acciones tácticas terrestres, con especial énfasis en funciones de reconocimiento y vigilancia (ISR), así como en la integración segura y funcional de los sistemas de control y visualización.

A partir del objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y modelar en Autodesk Inventor las modificaciones necesarias sobre la plataforma base, incluyendo elementos estructurales y de soporte que permitan la integración adecuada de la electrónica y los distintos subsistemas.
- Realizar estudios cinemáticos sobre el modelo desarrollado con el fin de analizar su comportamiento dinámico, maniobrabilidad y adecuación a un posible empleo en escenarios de carácter militar.
- Fabricar mediante impresión 3D las piezas diseñadas, evaluando su integración física en el vehículo y su funcionalidad dentro del conjunto del sistema.
- Integrar un sistema de visión mediante cámara que permita proporcionar al operador seguimiento visual continuo del entorno, mejorando las capacidades de reconocimiento del vehículo.
- Modificar y programar el sistema de radiocontrol con el objetivo de obtener mejores prestaciones en términos de control, estabilidad y fiabilidad frente a un radiocontrol convencional.

1.5 Estructura del trabajo

Este trabajo se ha estructurado en los siguientes capítulos:

1. Introducción. En este capítulo se presenta el marco general del trabajo, incluyendo los antecedentes que dan origen al proyecto, la motivación para su realización, los objetivos planteados y la organización de la memoria.
2. Estado del Arte. Este capítulo expone el marco teórico y técnico relacionado con los vehículos terrestres no tripulados (UGV), centrándose en los *Small UGV* (SUGV) aplicados al ámbito militar. Se analizan su evolución histórica, tipología, principales aplicaciones, capacidades y limitaciones, así como las tendencias actuales y consideraciones normativas relevantes.
3. Desarrollo del trabajo. En este apartado se describe el proceso de desarrollo del proyecto, abordando el análisis del sistema y la adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un *Small UGV*. Se detallan las decisiones de diseño adoptadas, el modelado del sistema mediante herramientas de diseño asistido por ordenador, la integración de modificaciones estructurales y funcionales, así como los estudios cinemáticos realizados.
4. Resultados. Este capítulo recoge los resultados obtenidos tras el desarrollo e integración del sistema, incluyendo la evaluación del comportamiento del UGV, el análisis de los estudios realizados y la valoración de las prestaciones alcanzadas en relación con los objetivos definidos.
5. Conclusiones y líneas futuras. En el último capítulo se presentan las conclusiones extraídas del trabajo realizado, valorando el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos. Asimismo, se plantean posibles líneas de mejora y desarrollos futuros derivados del proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción del apartado

En este apartado se aborda la evolución, tipología y principales aplicaciones, así como las capacidades y limitaciones asociadas al empleo de los UGV como apoyo a pequeñas unidades en operaciones tácticas. Asimismo, se describen los elementos tecnológicos que caracterizan este tipo de sistemas, incluyendo aspectos relacionados con la movilidad, el control, las comunicaciones y los sensores. Finalmente, se introduce el papel de las herramientas de diseño asistido por ordenador y de la informática gráfica en el desarrollo y análisis de vehículos no tripulados

2.2 Vehículos terrestres no tripulados (UGV)

Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) son sistemas capaces de desplazarse sobre el terreno sin tripulación a bordo, operando mediante control remoto o con distintos niveles de autonomía [1] [2]. En el ámbito militar, su empleo se orienta a la realización de tareas que pueden implicar un riesgo elevado para el personal, permitiendo apoyar a las unidades en operaciones terrestres [3]. Estos sistemas forman parte del proceso de incorporación de plataformas no tripuladas en las fuerzas armadas, impulsado por el avance tecnológico y por las necesidades operativas actuales. La existencia de UGVs de diferentes tamaños y configuraciones ha ampliado su campo de aplicación en escenarios tácticos diversos, como se puede apreciar en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Tipos de UGV [Autoría propia uso de IA]

En dicha figura se recogen varias escenas representativas de esa diversidad. En la parte superior izquierda se observa una plataforma de mayor tamaño, con configuración 8x8 y estación de armas, que refleja la tendencia hacia vehículos no tripulados con mayor capacidad de carga, protección e integración de sistemas de combate. En la parte superior derecha aparece un UGV más compacto de ruedas, representativo de plataformas ligeras y versátiles, adecuadas para tareas de observación o apoyo. En la parte inferior izquierda se muestra una plataforma de cadenas equipada con un brazo o mástil sensor, lo que sugiere su utilidad en espacios complejos o zonas urbanas. En la zona central inferior se aprecia otro UGV ligero con sensores elevados, orientado a mejorar la observación del entorno desde una posición adelantada. Finalmente, en la parte inferior derecha se representa una plataforma teleoperada desde una estación portátil, imagen que ilustra de forma clara la relación entre el vehículo y el operador durante el empleo táctico.

2.2.1 Origen y evolución histórica

El concepto de vehículo terrestre no tripulado (UGV) aplicado al ámbito militar posee una trayectoria histórica que se extiende a lo largo de más de un siglo. Su origen se encuentra en los primeros intentos de controlar vehículos a distancia con el objetivo de reducir la exposición humana en entornos peligrosos. Desde sus inicios, la evolución de estos sistemas ha estado condicionada por dos factores fundamentales: el nivel de desarrollo tecnológico disponible en cada etapa histórica y las necesidades operativas surgidas de los conflictos armados [3].

Uno de los antecedentes iniciales del control remoto se sitúa a comienzos del siglo XX con el trabajo del ingeniero español Leonardo Torres Quevedo, quien desarrolló el sistema conocido como *Telekino* [4]. En torno a 1904, el español logró controlar por radio un triciclo a una distancia aproximada de entre 20 y 30 metros, demostrando por primera vez la viabilidad técnica de transmitir órdenes inalámbricas a un vehículo sin conductor [5]. Aunque el *Telekino*, mostrado en la Figura 2-2, no fue concebido como un sistema militar, su importancia histórica es notable, ya que estableció el principio básico de la teleoperación, que constituye la base conceptual de todos los UGV posteriores [6].



Figura 2-2 Sistema Telekino [4]

Durante la Primera Guerra Mundial, la guerra de trincheras y la existencia de defensas fortificadas generaron una necesidad urgente de soluciones que permitieran abrir brechas sin exponer directamente a los soldados. En este contexto surgieron los primeros UGV con aplicación estrictamente militar. En 1915, Francia desarrolló los llamados torpedos terrestres *Aubriot-Gabet*, pequeños vehículos autopropulsados cargados con explosivos y dirigidos hacia posiciones enemigas, ilustrados en la Figura 2-3 [7]. Estos sistemas eran técnicamente rudimentarios, con escasa fiabilidad y limitada capacidad de control, pero representaron un primer intento real de emplear vehículos no tripulados como herramientas de demolición a distancia [8].



Figura 2-3 Torpedo terrestre Aubriot-Gabet [7]

Durante la década de 1930, la Unión Soviética impulsó el desarrollo de los denominados teletanques, versiones teleoperadas de tanques ligeros como el TT-26, mostrado en la Figura 2-4, armadas con ametralladoras o lanzallamas y controladas desde un carro tripulado que actuaba como puesto de mando [9]. Estos sistemas llegaron a emplearse en combate real durante la Guerra de Invierno contra Finlandia y en las primeras fases de la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, existían importantes limitaciones, como la vulnerabilidad del enlace de control y la dificultad para maniobrar eficazmente en entornos de combate dinámicos [10].



Figura 2-4 Teletanque soviético TT-26 [9]

De forma paralela, en el Reino Unido se experimentó con un tanque sin tripulación basado en el Matilda II, conocido informalmente como *Black Prince*, desarrollado para atraer fuego enemigo o demoler fortificaciones [11]. Este proyecto fue cancelado debido a su elevada complejidad técnica y a los costes asociados. Alemania, por su parte, desplegó a partir de 1942 el conocido *Goliath*, un pequeño vehículo oruga no tripulado cargado con aproximadamente 60 kg de explosivo y controlado mediante un cable. Aunque el *Goliath*, ilustrado en la Figura 2-5, supuso una solución ingeniosa para demoliciones a distancia, su bajo blindaje, su limitada velocidad, la vulnerabilidad del cable y su elevado coste unitario redujeron notablemente su efectividad en combate [12] [13].



Figura 2-5 Vehículo alemán Goliath [12]

Tras el final de la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de los UGV experimentó un periodo de estancamiento. Las prioridades estratégicas se desplazaron hacia los vehículos blindados tripulados y las armas nucleares, mientras que las limitaciones tecnológicas seguían dificultando el control remoto fiable en entornos complejos. No obstante, la investigación en robótica y automatización continuó avanzando, especialmente en entornos académicos y de investigación [14].

Un nuevo impulso se produjo en la década de 1960 gracias a los avances en inteligencia artificial y robótica promovidos por DARPA. En este contexto, como se observa en la Figura 2-6, se desarrolló el proyecto Shakey, un robot móvil con ruedas equipado con sensores y una cámara de televisión, capaz de realizar planificación básica y navegar de forma autónoma en entornos controlados. Es considerado un hito fundamental en la historia de los UGV ya que introdujo el concepto de percepción del entorno y toma de decisiones basada en software.



Figura 2-6 Robot móvil Shakey [14]

Durante los años 80 el ejército de los Estados Unidos junto con otras organizaciones desarrolló el *Autonomous Land Vehicle* (ALV), considerado el primer UGV capaz de desplazarse de forma autónoma por carreteras y terrenos abiertos a velocidades relevantes [15]. Este proyecto demostró la viabilidad técnica de la conducción autónoma terrestre. Se puede ver ilustrado en la Figura 2-7.



Figura 2-7 Autonomous Land Vehicle (ALV) [15]

La consolidación definitiva de los UGV como sistemas operativos se produjo a partir de la década de 1990 con la presencia de conflictos asimétricos. En escenarios como Irak y Afganistán, los UGV se desplegaron masivamente en misiones de desactivación de explosivos (EOD), destacando en la Figura 2-8 sistemas como *PackBot* y *TALON*, que permitieron inspeccionar y neutralizar artefactos explosivos improvisados sin exponer a los zapadores, salvando numerosas vidas [16], [17].



Figura 2-8 Robot EOD PackBot [16]

En paralelo, comenzaron a desarrollarse UGV armados, entre los que destacó el sistema estadounidense *SWORDS* (*Special Weapons Observation Remote Direct-Action System*), una versión armada del robot *TALON* concebida para misiones de combate de alto riesgo. Se trataba de una plataforma terrestre teleoperada, equipada inicialmente con una ametralladora M249, aunque su arquitectura permitía integrar otros sistemas de armas como la M240, el M16 o lanzagranadas, lo que reflejaba de forma clara el interés por estudiar el empleo ofensivo de robots terrestres en apoyo directo a la maniobra. En 2007, tres unidades fueron desplegadas en Irak con la 3.^a División de Infantería estadounidense, donde llegaron a emplearse en tareas de reconocimiento y patrulla. Sin embargo, su implantación operativa no llegó a consolidarse. El sistema puso de manifiesto tanto el potencial de estos medios para reducir la exposición del combatiente como las dificultades todavía existentes en aquel momento en ámbitos como la fiabilidad del control remoto, la seguridad en el empleo del armamento, la definición de procedimientos tácticos y la integración doctrinal dentro de las unidades [18] [19].

En la década de 2020, los UGV han entrado en una nueva fase de evolución, participando directamente en acciones de combate en conflictos recientes como la guerra de Ucrania. A diferencia de experiencias anteriores más limitadas, el empleo actual de estas plataformas se ha ampliado y diversificado, incorporando no solo misiones de reconocimiento, sino también tareas de evacuación de

bajas, desminado y, en algunos casos, apoyo de fuego directo. Este cambio refleja un punto de inflexión importante, ya que los UGV han pasado de ser sistemas experimentales o muy especializados a convertirse en herramientas cada vez más presentes en el campo de batalla contemporáneo [20]. Este nuevo contexto se puede ver reflejado en la Figura 2-9.



Figura 2-9 Sistema SWORDS [18]

En conjunto, esta evolución histórica evidencia que los UGV han pasado de ser experimentos tecnológicos a convertirse en sistemas relevantes dentro del campo de batalla moderno. Este recorrido justifica el interés actual por plataformas de menor tamaño, como los *Small UGV*, que ofrecen un equilibrio entre coste, portabilidad y utilidad táctica para el apoyo directo a pequeñas unidades [21].

2.2.2 Clasificación y tipología

A lo largo de su evolución, los UGV se han adaptado a necesidades operativas muy diversas, dando lugar a múltiples enfoques. No obstante, es habitual emplear criterios como el grado de autonomía, el tipo de misión, así como factores complementarios como el tamaño, el peso o el sistema de locomoción [1]. Estas clasificaciones permiten comprender mejor el papel que desempeñan los distintos UGV dentro del conjunto de sistemas terrestres no tripulados.

2.2.2.1 Clasificación según el grado de autonomía

Uno de los factores más relevantes que condicionan el diseño y el empleo de un vehículo terrestre no tripulado es su grado de autonomía, ya que determina el nivel de intervención humana durante la misión. Este parámetro influye directamente en la complejidad del sistema, la carga de trabajo del operador y el tipo de tareas que puede realizar el UGV. En función de este criterio, los vehículos terrestres no tripulados pueden agruparse en tres categorías principales, que se describen a continuación y se resumen en la Tabla 2-1 [1], [3].

Tipo	Características y usos	Ejemplos
UGV teleoperados	Sistemas controlados íntegramente por un operador humano a distancia. Su principal característica es el control directo y continuo, lo que proporciona un comportamiento predecible y seguro. Se emplean principalmente en misiones donde la fiabilidad es prioritaria, como la desactivación de explosivos, la inspección de zonas peligrosas o el reconocimiento cercano.	
UGV semiautónomos	Combinan control humano con funciones automáticas básicas, como el seguimiento de rutas o el flanqueamiento de obstáculos simples. Este enfoque reduce la carga del operador y mejora la eficiencia operativa. Son habituales en tareas de apoyo a pequeñas unidades, logística ligera y reconocimiento, requiriendo siempre supervisión humana.	
UGV autónomos	Capaces de ejecutar misiones con mínima intervención humana gracias al uso de sensores y sistemas de decisión avanzados. Ofrecen un alto potencial operativo, pero su empleo militar es todavía limitado y experimental. Actualmente se utilizan en pruebas de vigilancia persistente y operaciones de bajo riesgo.	

Tabla 2-1 Clasificación de UGVs por autonomía

2.2.2.2 Clasificación por función y aplicación

Los UGV pueden clasificarse según la misión principal para la que han sido diseñados, lo que permite relacionar sus características técnicas con su empleo operativo. En función de este criterio, se distinguen varias categorías de UGV en el ámbito militar, que se describen a continuación en la Tabla 2-2 [18], [19].

Tipo	Características y usos
Reconocimiento, vigilancia e inteligencia (ISR)	Orientados a la obtención de información del entorno sin exponer al personal. Se caracterizan por su tamaño reducido, bajo perfil y la integración de cámaras y sensores.
UGV logísticos	Diseñados para el transporte de cargas y apoyo a la unidad. Permiten mover munición, agua, material médico o evacuar heridos, reduciendo la carga física del combatiente y mejorando la autonomía operativa de pequeñas unidades.
UGV EOD (<i>Explosive Ordnance Disposal</i>)	Especializados en la detección, inspección y neutralización de artefactos explosivos. Incorporan brazos manipuladores, cámaras y herramientas específicas.
UGV de combate	Plataformas equipadas con armamento letal destinadas a proporcionar apoyo de fuego o realizar acciones ofensivas. Su empleo operativo es limitado y se mantiene bajo control humano directo debido a requisitos de seguridad, fiabilidad y consideraciones doctrinales.

Tabla 2-2 Clasificación de UGVs por función y aplicación

2.2.2.3 Clasificación por tamaño y sistema de locomoción

Los UGV pueden clasificarse atendiendo a su tamaño/peso y al sistema de locomoción, factores que condicionan directamente su portabilidad, movilidad y capacidad de carga. En la Tabla 2-3 y en la Tabla 2-4 se pueden observar dichas clasificaciones [21].

Tipo	Características y usos
Ligeros	Plataformas compactas y transportables por uno o dos soldados. Se caracterizan por su rápida puesta en servicio y su empleo cercano a la unidad. Se utilizan principalmente en reconocimiento, vigilancia y misiones EOD de corto alcance.
Medianos	Presentan un mayor tamaño y capacidad de carga, permitiendo transportar sensores adicionales o suministros. Se emplean habitualmente en misiones de apoyo logístico, reconocimiento extendido y seguridad.
Grandes	Especializados en la detección, inspección y neutralización de artefactos explosivos. Incorporan brazos manipuladores, cámaras y herramientas específicas.

Tabla 2-3 Clasificación de UGVs por tamaño

Tipo	Características y usos
Ruedas	Poseen mayor velocidad, eficiencia energética y simplicidad mecánica. Ofrecen un buen rendimiento en superficies firmes y caminos preparados, siendo adecuados para misiones de patrulla, vigilancia perimetral y apoyo logístico en entornos relativamente accesibles. Su menor complejidad facilita el mantenimiento, aunque presentan limitaciones en terrenos blandos o muy irregulares.
Orugas	Destacan por su alta capacidad todoterreno y una mejor distribución del peso, permitiendo operar en terrenos difíciles como barro, arena o escombros. Son adecuados para reconocimiento cercano, EOD y operaciones en entornos urbanos.

Tabla 2-4 Clasificación de UGVs por sistema de locomoción

2.2.3 Aplicaciones militares y contexto actual en el ámbito nacional

En el contexto actual de las Fuerzas Armadas españolas, los vehículos terrestres no tripulados se consideran una capacidad emergente, cuyo empleo se encuentra en una fase de evaluación y análisis previo a una posible incorporación operativa. A diferencia de otros sistemas no tripulados ya consolidados, los UGV se están introduciendo de forma progresiva, atendiendo a su aportación real en términos de apoyo táctico, seguridad de la fuerza y reducción del riesgo humano [22], [23].

2.2.3.1 Ejército de Tierra

Dentro del ámbito nacional, el Ejército de Tierra es la fuerza que ha avanzado de manera más visible en la evaluación de UGV. Este interés se enmarca en los procesos de modernización y en el desarrollo de conceptos asociados a la Fuerza 2035 [22], donde los sistemas no tripulados se consideran elementos de apoyo a la maniobra terrestre.

En este contexto, el Ejército de Tierra ha evaluado plataformas UGV de tipo medio y modular, orientadas principalmente al apoyo logístico, la protección de la fuerza y la integración con unidades de infantería. Un ejemplo representativo en Figura 2-10 es el UGV *ThEMIS*, empleado para analizar su capacidad de transporte de cargas, evacuación de heridos y posible integración de estaciones de armas remotas [23], [24]. Estas evaluaciones permiten identificar ventajas y limitaciones antes de una eventual adopción operativa.



Figura 2-10 UGV ThEMIS del Ejército de Tierra [23]

2.2.3.2 Armada Española

En la Armada Española, y de forma particular en la Infantería de Marina, los UGV no forman actualmente parte de la dotación orgánica de las unidades. Sin embargo, su posible incorporación futura despierta un interés creciente, debido al perfil operativo de estas fuerzas.

La Infantería de Marina opera habitualmente en entornos anfibios, litorales y urbanos [22], donde la necesidad de reconocimiento previo, exploración de accesos y apoyo a pequeñas unidades resulta crítica. En este contexto, los UGV se conciben como herramientas de apoyo táctico, destinadas a complementar al combatiente y reducir su exposición en las fases más peligrosas de la operación.

Entre las plataformas que se consideran como referencia para este entorno destaca *Valkyrie*, un UGV mostrado en la Figura 2-11 con capacidad anfibia diseñado para operar en escenarios de desembarco y proyección desde la mar [25], [26]. Su concepción apunta a misiones como el reconocimiento inicial, el transporte de material en playa y el apoyo a la seguridad durante las primeras fases de una operación anfibia, donde la vulnerabilidad de la fuerza es elevada.



Figura 2-11 UGV Valkyrie [25]

Asimismo, plataformas modulares como *ThEMIS* o *TerMIT* representan una solución de interés para la Infantería de Marina en tareas de apoyo logístico ligero, transporte de cargas y evacuación de heridos [27]. Su diseño multirol, mostrado en la Figura 2-12, y su capacidad para adaptarse a distintos cometidos sin modificar la plataforma base encajan con las necesidades de unidades desplegadas en entornos cambiantes y con limitaciones logísticas.



Figura 2-12 UGV TerMIT [27]

Por último, en la Figura 2-13 se muestra el sistema *Wild Goose*, un UGV compacto orientado al apoyo a pequeñas unidades, con especial énfasis en la sencillez de empleo, la rapidez de despliegue y el impacto logístico reducido. Estas características los convierten en candidatos adecuados para su evaluación en ejercicios y ensayos dentro del ámbito de la Infantería de Marina [28].



Figura 2-13 UGV Wild Goose [28]

2.2.4 Ventajas y limitaciones en escenarios reales

El empleo de vehículos terrestres no tripulados en operaciones militares ha demostrado aportar una serie de ventajas operativas claras, especialmente en el nivel táctico. No obstante, la experiencia acumulada en escenarios reales también ha puesto de manifiesto limitaciones técnicas y operativas que condicionan su uso y deben tenerse en cuenta en su diseño y empleo [29].

Entre las principales ventajas operativas destaca, en primer lugar, la reducción del riesgo humano. Los UGV permiten realizar tareas de reconocimiento, exploración o desactivación de explosivos sin exponer directamente al personal, lo que supone una mejora significativa en términos de seguridad [16], [17]. Esta capacidad resulta especialmente valiosa en entornos urbanos o con presencia de artefactos explosivos improvisados, donde el riesgo para las pequeñas unidades es elevado.

Mediante la integración de cámaras y sensores, los UGV proporcionan información visual en tiempo real que permite a los mandos y a las unidades tomar decisiones más informadas. La posibilidad de observar zonas ocultas, accesos o itinerarios antes del avance contribuye a mantener la iniciativa táctica y a reducir la probabilidad de contacto inesperado con amenazas [29].

Asimismo, los UGV sirven de apoyo a las pequeñas unidades. Plataformas compactas como los *Small UGV* pueden desplegarse rápidamente, operar próximas a la unidad y adaptarse a distintas misiones con un impacto logístico limitado [21]. Su empleo permite ampliar el alcance de la unidad sin necesidad de incrementar el número de efectivos ni de introducir sistemas complejos.

Sin embargo, el uso de UGV en escenarios reales presenta también limitaciones significativas. Una de las más importantes es la dependencia del enlace de comunicaciones. La pérdida de señal, la latencia o las interferencias pueden comprometer el control del vehículo, especialmente en entornos urbanos, con obstáculos o bajo condiciones de guerra electrónica [29]. Esta dependencia limita el alcance efectivo y obliga a definir comportamientos seguros ante fallos de enlace.

Otra limitación relevante es la autonomía energética, particularmente en plataformas pequeñas. El reducido tamaño de los SUGV restringe la capacidad de baterías y, por tanto, el tiempo de operación, lo que condiciona la duración de las misiones y obliga a planificar cuidadosamente su empleo [30]. Del mismo modo, la capacidad de carga limitada impone restricciones en cuanto al número y tipo de sensores o equipos que pueden integrarse [31].

Desde el punto de vista de la movilidad, aunque los UGV pueden operar en terrenos complejos, no siempre igualan la capacidad de adaptación de un combatiente a pie. Obstáculos elevados, escalones pronunciados o terrenos extremadamente irregulares pueden limitar su avance y requerir la intervención directa de la unidad.

Por último, debe considerarse que la habilidad en el manejo de un UGV requiere formación específica y atención constante, lo que puede suponer una carga adicional para pequeñas unidades si no se integra adecuadamente en los procedimientos tácticos [3].

En conjunto, la experiencia en escenarios reales muestra que los UGV constituyen una herramienta de gran valor como apoyo táctico, siempre que se empleen de forma coherente con sus capacidades y limitaciones. Este equilibrio entre ventajas y restricciones resulta especialmente relevante en el caso de los *Small UGV*, cuyo diseño debe orientarse a maximizar la utilidad operativa sin introducir una complejidad excesiva [21].

2.3 Configuración técnica de un UGV

La configuración técnica de un vehículo terrestre no tripulado define la forma en que se integran sus principales subsistemas mecánicos, de control y percepción. Este apartado describe los bloques técnicos fundamentales que componen un UGV y los criterios de diseño asociados.

2.3.1 Plataforma móvil y locomoción

La plataforma móvil constituye el elemento estructural y funcional central de un vehículo terrestre no tripulado, ya que condiciona de forma directa su movilidad, estabilidad, capacidad de carga y adaptación al entorno operativo. En el diseño de un UGV, la elección de la plataforma no responde únicamente a criterios mecánicos, sino que debe atender a las exigencias del terreno, al tipo de misión prevista y a las limitaciones propias de los sistemas no tripulados, como la autonomía energética y la fiabilidad del control remoto [21].

Desde el punto de vista del diseño, la plataforma móvil integra el chasis, el sistema de propulsión, la transmisión de potencia y el sistema de suspensión. Estos elementos deben diseñarse de manera conjunta para garantizar un desplazamiento controlado y predecible, especialmente a bajas velocidades, que es el régimen de operación más habitual en UGVs orientados al apoyo táctico.

Uno de los primeros factores a considerar es el sistema de locomoción, que determina la interacción del vehículo con el terreno. En el ámbito militar, los UGV emplean mayoritariamente sistemas basados en ruedas u orugas, cada uno con ventajas y limitaciones claramente diferenciadas.

2.3.1.1 Sistemas basados en ruedas

Los sistemas de locomoción mediante ruedas se caracterizan por una mayor simplicidad mecánica, menor consumo energético y una eficiencia elevada en superficies firmes o parcialmente preparadas. Estas características los hacen adecuados para escenarios donde predominan caminos, pistas o entornos urbanos con firme estable. Además, los UGV con ruedas suelen alcanzar mayores velocidades y presentan menores necesidades de mantenimiento [21].

Sin embargo, su rendimiento disminuye de forma notable en terrenos blandos, irregulares o con gran cantidad de obstáculos, donde la pérdida de tracción puede limitar la movilidad. Por este motivo, su empleo en UGV orientados a zonas embarradas o áreas con escombros suele ser más restrictivo [21].

2.3.1.2 Sistemas basados en orugas

Los UGV con orugas presentan una mejor distribución del peso y mayor superficie de contacto con el terreno, lo que se traduce en una capacidad todoterreno superior. Este tipo de locomoción permite operar con mayor fiabilidad sobre arena, barro, grava o superficies irregulares, así como superar obstáculos de mayor entidad a baja velocidad. Por ello, las orugas son una solución habitual en UGV diseñados para misiones de reconocimiento cercano y apoyo a pequeñas unidades.

Como contrapartida, los sistemas de orugas suelen implicar una mayor complejidad mecánica, un consumo energético más elevado y velocidades máximas inferiores a las de plataformas con ruedas. Estas limitaciones obligan a un diseño cuidadoso del sistema de transmisión y de la gestión energética, especialmente en plataformas compactas.

2.3.1.3 Estabilidad, suspensión y capacidad de carga

Independientemente del sistema de locomoción que se decida, la estabilidad del conjunto resulta crítica en un UGV. La ausencia de un operador a bordo implica que cualquier desequilibrio, vuelco o bloqueo mecánico debe prevenirse mediante el diseño, ya que la recuperación del vehículo en entorno operativo puede no ser inmediata. Por ello, se busca un centro de gravedad bajo, una anchura adecuada de la plataforma y sistemas de suspensión que permitan absorber irregularidades del terreno sin comprometer el control. [30]

La capacidad de carga de la plataforma condiciona directamente la integración de sensores, sistemas de control y fuentes de energía. En UGVs de tamaño reducido, este aspecto adquiere especial relevancia, ya que un aumento excesivo de peso puede penalizar tanto la autonomía como la maniobrabilidad. El diseño del chasis debe, por tanto, equilibrar resistencia estructural, peso y facilidad de integración de componentes.

En conjunto, la plataforma móvil y el sistema de locomoción constituyen la base sobre la que se construye el resto del sistema UGV. Una elección adecuada en esta fase permite maximizar la fiabilidad, la movilidad y la seguridad del vehículo, sentando las bases para una integración eficaz de los sistemas de control, comunicaciones y sensores, que se abordan en los siguientes apartados.

2.3.2 Sistemas de control y comunicaciones

Los sistemas de control y comunicaciones constituyen el nexo funcional entre el operador y el vehículo, determinando la precisión de la maniobra, la seguridad del sistema y el alcance efectivo de la operación. En un UGV, estos sistemas deben garantizar un control fiable a baja velocidad, una respuesta predecible ante órdenes del operador y un comportamiento seguro frente a fallos de enlace [1].

Desde un punto de vista funcional, el sistema de control se encarga de traducir las órdenes de alto nivel, como el movimiento o el giro, en acciones sobre los actuadores del vehículo, mientras que el sistema de comunicaciones permite el intercambio bidireccional de datos entre el UGV y la estación de control. Ambos elementos deben diseñarse de forma conjunta para evitar latencias o pérdidas de control [32], [33], [34].

2.3.2.1 Modos de control de UGV

En UGVs de tamaño reducido y uso táctico, el control suele basarse en teleoperación, donde el operador mantiene la responsabilidad directa sobre el movimiento del vehículo. Este enfoque permite una supervisión constante y resulta especialmente adecuado en entornos complejos. No obstante, para reducir la carga de trabajo del operador, es habitual incorporar funciones de asistencia al control, como limitación de velocidad, suavizado de aceleraciones o mantenimiento de rumbo.

La estación de control puede variar desde un mando de radiocontrol convencional hasta una consola con pantalla, *joysticks* y sistemas de visualización de datos. En el ámbito militar, la interfaz debe ser intuitiva y robusta, permitiendo al operador concentrarse en la misión sin necesidad de una formación excesivamente compleja [35].

En UGV de pequeño y medio tamaño, el sistema de control suele componerse de dos elementos diferenciados:

- Controladora de autopiloto (hardware): Unidad física encargada de procesar las entradas y generar las señales de control hacia actuadores y subsistemas. Entre las más empleadas se encuentran las de la familia Pixhawk/CubePilot.
- Firmware de control (software): Programa instalado en la controladora que define la lógica de funcionamiento del vehículo. En plataformas terrestres, uno de los más utilizados es ArduPilot Rover, que permite gestionar el movimiento, los motores diferenciales, los límites de velocidad y los modos de seguridad.

2.3.2.2 Sistemas de comunicaciones

El enlace de comunicaciones es un elemento crítico en cualquier UGV ya que condiciona el alcance operativo. Habitualmente, estos sistemas emplean enlaces de radio en bandas comerciales o militares, capaces de transmitir órdenes de control y datos como vídeo [29].

El enlace de comunicaciones debe soportar control en tiempo real y, en muchos casos, vídeo en directo. Técnicamente, los UGV emplean combinaciones de los siguientes sistemas:

- Radio RC (2.4 GHz / 915 MHz): para control manual directo.
- Enlaces de telemetría MAVLink sobre radio (433 MHz / 868–915 MHz), utilizados por ArduPilot [32].
- Enlaces Wi-Fi o LTE/5G para transmisión de vídeo y datos en entornos controlados.

En entornos operativos reales, el enlace puede verse afectado por obstáculos, interferencias o condiciones del terreno, por lo que es esencial definir mecanismos de seguridad ante la pérdida de comunicación. Entre estos mecanismos se incluyen la parada automática del vehículo o el retorno a una posición segura.

Los sistemas de control incluyen mecanismos automáticos de seguridad como:

- *Failsafe* por pérdida de enlace en el que el UGV actuará realizando una parada inmediata o detención progresiva.
- Supervisión de tensión de batería y corriente.
- Límites software de velocidad y aceleración.

Estas funciones están integradas de forma nativa en ArduPilot Rover, haciéndolo especialmente adecuado para UGV orientados a apoyo táctico [33], [34].

2.4 Herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD)

El desarrollo de los vehículos terrestres no tripulados ha ido acompañado de una evolución paralela en las herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), que se han convertido en un elemento esencial dentro de los procesos de ingeniería modernos. Estas herramientas permiten analizar y modificar sistemas complejos de forma virtual antes de su fabricación, reduciendo de manera significativa los tiempos de desarrollo, los costes asociados a prototipos físicos y el riesgo de errores en fases avanzadas del proyecto [31].

En el ámbito militar, y de manera particular en el desarrollo de UGV, el uso de software CAD resulta especialmente relevante debido a la complejidad mecánica, electrónica y funcional de este tipo de plataformas. Un UGV integra sistemas de propulsión, transmisión, suspensión, electrónica de control, sensores y estructuras portantes en un espacio reducido, lo que exige un alto grado de precisión y coordinación entre estos. El diseño asistido por ordenador permite abordar esta complejidad de forma ordenada, facilitando la integración de todos los subsistemas dentro de un único entorno digital [36].

Además, el CAD no se limita únicamente al diseño geométrico. Las herramientas actuales permiten realizar estudios cinemáticos, simulaciones de movimiento y evaluaciones preliminares del comportamiento del sistema, lo que resulta especialmente útil en plataformas móviles como los UGV.

2.4.1 Diseño digital

El diseño digital constituye la base del proceso de desarrollo de cualquier sistema mecánico moderno y adquiere una importancia aún mayor en proyectos de carácter experimental o de bajo coste, como es el caso de los *Small* UGV. Mediante el uso de herramientas CAD, es posible crear un modelo tridimensional completo del sistema, representando con precisión tanto la geometría externa como la disposición interna de los componentes.

Uno de los principales beneficios del diseño digital es la posibilidad de trabajar a partir de un modelo inicial donde el diseñador puede introducir modificaciones sucesivas en el chasis, la transmisión, los soportes o la distribución interna de la electrónica, evaluando de forma inmediata el impacto de estos cambios en el conjunto. Este enfoque resulta especialmente ventajoso frente a métodos tradicionales basados en prototipos físicos, donde cada modificación implica un mayor coste tanto en tiempo como recursos.

En el contexto de los UGV, el diseño digital permite también analizar aspectos clave como el volumen disponible para la electrónica, la accesibilidad para mantenimiento, la ubicación del centro de masas o la compatibilidad entre distintos componentes comerciales. Asimismo, facilita la reutilización de diseños existentes, ya sea mediante la importación de modelos externos o la adaptación de plataformas comerciales, lo que resulta coherente con la filosofía de desarrollo de UGV de bajo coste y rápida implementación.

Por último, el diseño digital constituye el paso previo para la fabricación mediante impresión 3D. A partir del modelo CAD, pueden generarse directamente los archivos necesarios para la fabricación de piezas personalizadas [37].

2.4.2 Diseño CAD del UGV

La aplicación del diseño asistido por ordenador al desarrollo de UGV presenta una serie de particularidades que lo diferencian de otros proyectos mecánicos convencionales. En primer lugar, un UGV es un sistema en el que confluyen mecánica, electrónica y control. El CAD actúa como elemento integrador, permitiendo coordinar estos ámbitos dentro de un único modelo digital.

En el diseño de UGV, el CAD se emplea para definir la arquitectura general del vehículo, incluyendo el chasis, el sistema de tracción, la transmisión, la suspensión y los elementos estructurales necesarios para soportar cargas dinámicas. Al mismo tiempo, permite planificar la integración de la electrónica de control, sensores, cámaras y sistemas de comunicación, asegurando que todos los componentes disponen del espacio necesario y que su disposición es compatible con los requisitos funcionales y operativos del vehículo [37].

Otro aspecto especialmente relevante es la posibilidad de realizar estudios cinemáticos y de movimiento. Mediante el CAD es posible simular el comportamiento de la transmisión, analizar la relación de reducción, comprobar el sentido de giro de los ejes y evaluar la interacción entre engranajes y ruedas motrices. Este tipo de análisis resulta fundamental en UGV con tracción por orugas, donde la correcta transmisión del par y la maniobrabilidad a baja velocidad son factores críticos [36].

Asimismo, el uso de CAD facilita la adaptación de plataformas comerciales o radiocontroladas a aplicaciones más avanzadas. A través del modelado digital, es posible rediseñar carcasas, soportes y estructuras para alojar nuevos componentes, como sistemas de visión, GPS o módulos de comunicación, sin necesidad de modificar el conjunto completo. Este enfoque permite transformar un vehículo recreativo en una plataforma experimental con capacidades próximas a las de un UGV militar de pequeño tamaño.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del apartado

En el presente apartado se expone el proceso de elaboración del Trabajo Fin de Grado, estructurado en tres etapas, tal y como se muestra en la Figura 3-1.

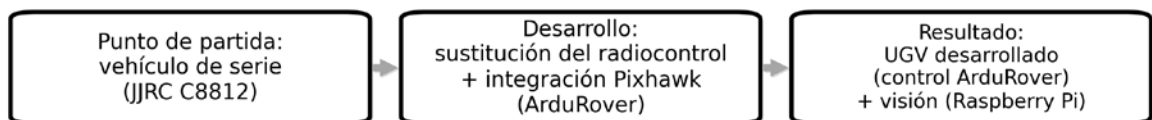


Figura 3-1 Fases del proyecto [Autoría propia uso de IA]

En primer lugar, se parte del vehículo en su configuración de serie, realizando el estudio previo y el análisis de la plataforma base. A continuación, se desarrolla la fase de trabajo principal, centrada en la sustitución del sistema original de radiocontrol y en la integración de la controladora Pixhawk configurada con ArduRover. Por último, se describe el estado final alcanzado, correspondiente al UGV desarrollado, en el que queda integrada una capacidad de visión embarcada basada en Raspberry Pi, configurada para la retransmisión remota de vídeo y su puesta en servicio de forma autónoma.

3.2 Estudio previo

Antes de abordar el desarrollo técnico del sistema propuesto, resulta imprescindible realizar un estudio previo que permita establecer una base sólida sobre la que fundamentar las decisiones de diseño adoptadas a lo largo del trabajo. Este estudio tiene como finalidad analizar, por un lado, los principios generales que definen la arquitectura y el funcionamiento de un vehículo terrestre no tripulado y, por otro, evaluar las características de distintas plataformas comerciales susceptibles de ser empleadas como punto de partida.

El estudio previo no persigue el diseño de un UGV desde cero, sino la adaptación de una plataforma existente, lo que exige comprender tanto las capacidades como las limitaciones inherentes a este tipo de vehículos. Para ello, se ha considerado necesario identificar los subsistemas esenciales que conforman un UGV convencional, así como analizar los criterios que permiten seleccionar una plataforma base adecuada para su transformación en un sistema con mayores prestaciones.

Este enfoque resulta apropiado en el contexto del presente Trabajo Fin de Grado, cuyo objetivo es desarrollar un UGV de bajo coste orientado al apoyo a pequeñas unidades. La realización de un estudio previo permite reducir riesgos en fases posteriores, evitar decisiones de diseño arbitrarias y garantizar que las modificaciones propuestas respondan a necesidades reales y estén justificadas desde un punto de vista técnico.

3.2.1 Elección del modelo base

La plataforma base empleada en el trabajo ya venía fijada desde el inicio y constituye un elemento relevante del desarrollo, ya que debía permitir comenzar el proyecto sobre una base real y, al mismo tiempo, ofrecer posibilidades suficientes para cumplir los requisitos planteados. Se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre distintas plataformas comerciales de vehículos todoterreno radiocontrolados disponibles en el mercado, incluyendo modelos con ruedas y con orugas, de diferentes dimensiones y configuraciones mecánicas que se muestran en la Figura 3-2.



Figura 3-2 Plataformas comerciales [38]

Durante este proceso se han definido una serie de criterios técnicos orientados a evaluar la idoneidad de cada plataforma para su empleo como *Small Unmanned Ground Vehicle* en un contexto táctico. Para ello se ha valorado la estabilidad del vehículo, su geometría, su capacidad de carga y la posibilidad de estudiar, al menos a nivel teórico, la integración de cargas útiles adicionales sin comprometer la seguridad ni el control del sistema.

Otro criterio fundamental ha sido la capacidad de vigilancia y reconocimiento, analizada en función de la facilidad para integrar cámaras y sensores en posiciones adecuadas, garantizando un campo de visión útil y una operación estable del vehículo. En este sentido, se ha considerado especialmente importante la existencia de volumen interno suficiente y de puntos estructurales que permitan la fijación de dispositivos sin alterar de forma significativa el comportamiento dinámico del conjunto.

Asimismo, se ha valorado la versatilidad y modularidad de la plataforma. Este criterio hace referencia a la capacidad del vehículo para adaptarse a distintas configuraciones mediante modificaciones relativamente sencillas del chasis o la redistribución de los componentes internos. Una plataforma modular facilita la evolución del diseño, permite la incorporación progresiva de nuevas capacidades y resulta especialmente adecuada para un proyecto de carácter experimental como el presente.

La resistencia en entornos hostiles ha constituido otro factor determinante en la elección. Se ha analizado la capacidad del vehículo para operar sobre terrenos irregulares, absorber vibraciones, soportar

impactos moderados y proteger los componentes internos frente a polvo, suciedad o pequeñas proyecciones. Este aspecto resulta clave en vehículos destinados a operar en escenarios no estructurados y en condiciones ambientales adversas.

Finalmente, se han tenido en cuenta criterios prácticos como la disponibilidad comercial, el coste de adquisición y la facilidad de desmontaje y modificación del vehículo. Estos factores influyen directamente en la viabilidad del proyecto y en la posibilidad de realizar un análisis detallado y modificaciones sin necesidad de recurrir a procesos complejos o costosos.

Como resultado el modelo base es el JJRC C8812, un vehículo todoterreno radiocontrolado con tracción por orugas que constituye una réplica a escala del vehículo real Ripsaw EV2. Esta plataforma presenta una configuración claramente orientada a la movilidad todoterreno, un diseño estable y un volumen interno suficiente para la integración de nuevos sistemas, lo que la convierte en una base adecuada para su adaptación como UGV de bajo coste.

3.2.2 Elementos principales de un UGV

Para abordar de forma coherente el diseño de un vehículo terrestre no tripulado resulta necesario identificar previamente los elementos fundamentales que componen un UGV convencional, así como comprender la función que desempeña cada uno de ellos dentro del sistema. Este análisis permite establecer una estructura clara y sirve como referencia para el desarrollo posterior del diseño propio mediante herramientas de diseño asistido por ordenador.

Desde un punto de vista funcional, un UGV puede dividirse en varios subsistemas principales: plataforma móvil, sistema de propulsión, sistema de control, sistema de alimentación, sensores y sistemas de percepción, y chasis o estructura portante. La correcta integración de estos subsistemas determina el comportamiento global del vehículo, su fiabilidad y su adecuación a los requisitos operativos.

La plataforma móvil constituye la base del UGV y engloba el conjunto de elementos encargados del desplazamiento sobre el terreno. En función del entorno de operación, esta plataforma puede adoptar configuraciones con ruedas u orugas. En aplicaciones todoterreno, las orugas permiten una mejor distribución del peso y una mayor superficie de contacto con el suelo, lo que se traduce en una tracción superior y una mayor capacidad para superar obstáculos. La incorporación de sistemas de suspensión o amortiguación contribuye a mantener el contacto con el terreno y a mejorar la estabilidad del vehículo en superficies irregulares.

El sistema de propulsión es el responsable de generar el movimiento del UGV. Generalmente está compuesto por uno o varios motores eléctricos, junto con los elementos de transmisión necesarios para llevar el par hasta los elementos de tracción. En vehículos de pequeño tamaño se prioriza el uso de motores eléctricos por su simplicidad, facilidad de control y elevada disponibilidad de par a bajas velocidades. Este aspecto resulta especialmente importante en aplicaciones de apoyo táctico, donde la maniobrabilidad y el control preciso son más relevantes que la velocidad máxima.

El sistema de control actúa como el núcleo lógico del vehículo. Incluye la electrónica encargada de interpretar las órdenes del operador o del software de control y de gobernar los actuadores del sistema de propulsión. Este subsistema puede integrar controladoras, sensores inerciales y módulos de comunicación. Su diseño condiciona la precisión del movimiento, la estabilidad del vehículo y la posibilidad de incorporar funciones asistidas o semiautónomas, incluso en UGV concebidos principalmente para teleoperación.

El sistema de alimentación proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de todos los subsistemas. Habitualmente se emplean baterías recargables, cuya capacidad determina la autonomía del vehículo y cuya ubicación influye de forma directa en el centro de gravedad. Además, el sistema de alimentación puede incluir elementos de distribución y protección que garanticen un suministro estable

de energía a la electrónica de control, a los sensores y a los actuadores, evitando fallos derivados de caídas de tensión o sobrecargas.

Los sensores y sistemas de percepción permiten al UGV conocer tanto su estado interno como determinadas características del entorno. Entre los sensores más habituales se encuentran los sensores inerciales, empleados para estimar la orientación y la aceleración; sensores de velocidad o posición, utilizados para el control del movimiento; y sensores de estado, que permiten monitorizar parámetros como la tensión de la batería, la corriente consumida o la temperatura de los componentes. Estos sensores mejoran la seguridad, la estabilidad y la fiabilidad del sistema durante la operación.

Dentro de los sistemas de percepción, las cámaras desempeñan un papel especialmente relevante, ya que constituyen el principal medio de observación del entorno en UGVs teleoperados o de autonomía limitada. Las cámaras permiten al operador realizar tareas de vigilancia y reconocimiento, proporcionando información visual en tiempo real. Su correcta selección, ubicación y protección influyen directamente en la utilidad operativa del vehículo, especialmente en aplicaciones de ISR, donde la calidad de la información visual es un factor crítico.

Por último, el chasis o estructura portante constituye el elemento encargado de alojar y proteger todos los subsistemas anteriores. El diseño del chasis debe equilibrar resistencia estructural, peso y facilidad de acceso a los componentes, permitiendo tanto el mantenimiento como la integración de nuevos sistemas. En el contexto de este trabajo, el diseño del chasis mediante CAD adquiere una importancia especial, ya que permitirá adaptar la plataforma a distintos requisitos y configuraciones sin necesidad de modificar físicamente el vehículo en las primeras fases del desarrollo.

3.3 Análisis de la configuración original del vehículo

Una vez seleccionada la plataforma base, se procede a realizar un análisis detallado del vehículo en su configuración original. Este análisis tiene como finalidad estudiar la disposición real de los elementos mecánicos y electrónicos del sistema, así como su integración dentro del chasis, con el objetivo de comprender las decisiones de diseño adoptadas por el fabricante y evaluar sus implicaciones desde un punto de vista técnico.

El estudio del vehículo de serie se aborda descomponiendo el conjunto en subconjuntos funcionales, lo que permite analizar cada elemento de forma independiente y facilita la comparación posterior con las soluciones desarrolladas en el UGV propuesto.

3.3.1 Descripción general del vehículo de serie

El vehículo empleado como punto de partida es el JJRC C8812, un vehículo todoterreno radiocontrol de carácter recreativo que reproduce a escala el diseño del vehículo real Ripsaw EV2. Se trata de una plataforma concebida para uso lúdico, cuyo diseño prioriza la movilidad todoterreno, la estabilidad y una estética robusta inspirada en vehículos de tipo militar.

Desde el punto de vista constructivo, el vehículo de la Figura 3-3 presenta una configuración compacta con tracción mediante orugas, un chasis fabricado en material plástico moldeado y una distribución interna sencilla, pensada para alojar la batería y la electrónica básica necesaria para su funcionamiento. El sistema se entrega completamente ensamblado y operativo, permitiendo su uso inmediato mediante un mando de radiocontrol.

La arquitectura general del vehículo está claramente optimizada para un uso recreativo, sin contemplar la integración de electrónica adicional, sensores avanzados o cargas externas. No obstante, su tamaño, geometría y disposición interna permiten una adaptación técnica, siempre que se analicen previamente sus limitaciones estructurales y funcionales.



Figura 3-3 JJRC C8812 EV2

3.3.2 Arquitectura mecánica y disposición interna del vehículo original

El análisis de la arquitectura mecánica del JJRC C8812 se ha realizado descomponiendo el vehículo en sus principales subconjuntos, lo que ha permitido estudiar con mayor detalle la función y disposición de cada elemento, así como facilitar su posterior modelado mediante CAD.

- **Sistema de locomoción: orugas y ruedas de rodadura**

El sistema de locomoción del vehículo se basa en dos conjuntos de orugas laterales, accionados de forma diferencial. Cada oruga está constituida por una banda continua de material flexible que engrana con una serie de ruedas distribuidas a lo largo del lateral del chasis como se puede ver en la Figura 3-4.

Estas ruedas de rodadura se encuentran montadas sobre ejes individuales y disponen de un sistema de amortiguación, que permite absorber irregularidades del terreno y mantener el contacto de la oruga con la superficie. Este diseño contribuye a una mayor estabilidad del vehículo durante el desplazamiento y reduce la pérdida de tracción en terrenos irregulares.

Desde el punto de vista del modelado CAD, cada rueda constituye un elemento independiente con geometría sencilla, lo que facilita su reproducción digital y permite analizar su interacción con la banda de la oruga.



Figura 3-4 Vista de perfil del vehículo

- **Rueda tensora delantera y guiado de la oruga**

En la parte frontal de cada conjunto de oruga se dispone una rueda tensora, cuya función principal es regular la tensión de la banda de goma. Este elemento resulta esencial para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de tracción, evitando el destensado o el desplazamiento lateral de la oruga durante la operación. El mecanismo de tensado permite compensar pequeñas variaciones en la longitud efectiva de la oruga debidas al desgaste o a las deformaciones durante el uso. El análisis y modelado de la rueda tensora resulta relevante, ya que su geometría y posición condicionan la estabilidad de la oruga y la capacidad del vehículo para superar obstáculos sin pérdida de tracción, tal y como se aprecia en Figura 3-5 .



Figura 3-5 Ruedas delanteras tensoras

- **Transmisión y ruedas motrices**

La transmisión del movimiento desde el motor hasta las orugas se realiza mediante un sistema mecánico interno que acciona las ruedas motrices, situadas en la parte posterior de cada conjunto. Estas ruedas son las encargadas de transmitir el par generado por el motor a la banda de la oruga.

El diseño del sistema está orientado a que el vehículo pueda moverse con fuerza a baja velocidad, lo que le permite avanzar con facilidad y maniobrar correctamente, aunque no esté pensado para alcanzar grandes velocidades. Esta forma de funcionamiento encaja bien con el uso recreativo para el que fue concebido el vehículo y supone una base adecuada para un control más preciso del movimiento.

Desde el punto de vista del modelado, las ruedas motrices presentan una geometría específica adaptada al engranaje con la oruga, lo que las convierte en uno de los elementos más representativos del sistema de tracción, tal y como se aprecia en la Figura 3-6.



Figura 3-6 Caja de transmisión

- **Chasis y estructura portante**

El chasis del JJRC C8812 está fabricado en plástico moldeado y actúa como elemento estructural principal del vehículo. Su función es soportar el conjunto mecánico, alojar la batería y la electrónica, y proporcionar puntos de fijación para la carrocería exterior.

La geometría del chasis presenta una distribución interna sencilla, con compartimentos claramente definidos. Esta estructura contribuye a mantener un centro de gravedad bajo, favoreciendo la estabilidad del vehículo durante el desplazamiento y las maniobras de giro.

Además, el diseño contiene protección frente a impactos y para la integración de componentes adicionales.

Desde el punto de vista del proyecto, el chasis constituye uno de los elementos más importantes, ya que será objeto de modificación y rediseño mediante herramientas CAD. Una representación del chasis y empleado como referencia en el modelado se incluye en la Figura 3-7.



Figura 3-7 Parte superior del chasis

- **Alojamiento de la batería**

La batería del vehículo se aloja en un compartimento específico integrado en el chasis, situado en una posición baja y centrada. Esta ubicación contribuye a mejorar la estabilidad del conjunto y a reducir el riesgo de vuelco.

El compartimento, ilustrado en la Figura 3-8, presenta unas dimensiones ajustadas a la batería original, sin margen para alojar sistemas de mayor capacidad ni mecanismos avanzados de sujeción o protección. Este aspecto limita la posibilidad de aumentar la autonomía del vehículo sin modificar el diseño del chasis.

El análisis del alojamiento de la batería resulta clave para justificar posteriores modificaciones orientadas a mejorar la gestión energética y la integración de nuevas fuentes de alimentación.



Figura 3-8 Alojamiento de la batería en el chasis

- **Disposición de la electrónica original**

La electrónica del vehículo se concentra en una placa central, situada en el interior del chasis para reducir la exposición a suciedad y humedad. Esta placa integra el receptor de radiocontrol, el regulador de velocidad del motor y la distribución básica de la alimentación hacia los distintos

subsistemas. La disposición compacta de la electrónica simplifica el diseño, pero limita la modularidad y dificulta la integración de nuevos sistemas. El cableado es mínimo y está diseñado exclusivamente para los elementos originales del vehículo, sin previsión de ampliación. Esta disposición, mostrada en la Figura 3-9, constituye una referencia inicial que permite evaluar las carencias del sistema original y justificar la necesidad de una arquitectura electrónica más avanzada.



Figura 3-9 Alojamiento de la electrónica en el chasis

3.3.3 Arquitectura electrónica original

El sistema electrónico del vehículo JJRC C8812 está diseñado para satisfacer las necesidades básicas de un vehículo de radiocontrol recreativo, priorizando la simplicidad, el bajo coste y la facilidad de uso. Para ello, el fabricante ha optado por una arquitectura muy integrada, en la que la mayoría de las funciones electrónicas se concentran en una única placa central.

El análisis de esta arquitectura resulta fundamental para comprender cómo se gobierna el vehículo en su configuración original, cómo se distribuye la energía eléctrica y qué limitaciones presenta el sistema de cara a una posible ampliación o adaptación a usos más avanzados.

- **Placa electrónica central**

El elemento principal del sistema electrónico es una placa electrónica central, situada en el interior del chasis, que actúa como núcleo de control del vehículo. Esta placa integra en un único módulo varias funciones. Entre ellas se encuentran la recepción de las señales del mando de radiocontrol, el control del motor de tracción, la distribución de la alimentación eléctrica y el gobierno de sistemas auxiliares, como la iluminación. Esta integración permite reducir el número de componentes y simplificar el cableado, aunque limita considerablemente la modularidad del sistema.

Desde el punto de vista constructivo, la placa presenta un diseño compacto, con los componentes electrónicos soldados directamente sobre ella y conectores específicos para cada uno de los elementos del vehículo, tal como se muestra en la Figura 3-10.

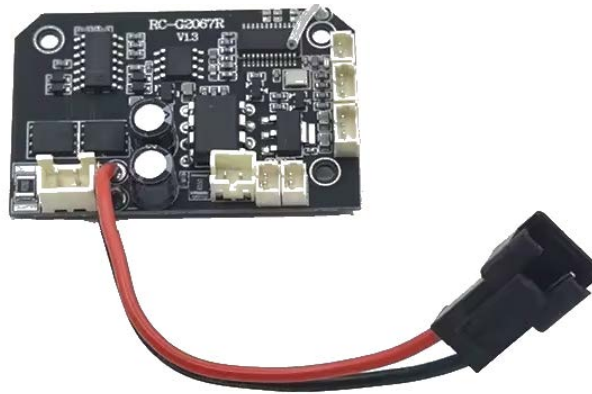


Figura 3-10 Placa electrónica

- **Sistema de radiocontrol y recepción de señales**

El control del vehículo se realiza mediante un mando de radiocontrol que transmite las órdenes básicas de movimiento. Estas señales son recibidas directamente por la placa electrónica central, sin la presencia de un receptor independiente, como se aprecia en la Figura 3-11.

El sistema permite controlar el avance, el retroceso y el giro del vehículo, pero no ofrece retorno de información al operador. Tampoco permite modificar parámetros de control ni ajustar el comportamiento dinámico, ya que se trata de un sistema cerrado y optimizado para el uso recreativo.

Este tipo de control resulta suficiente para la operación en línea de vista, pero presenta limitaciones importantes si se pretende emplear el vehículo a mayores distancias o integrarlo con sistemas de control más avanzados.



Figura 3-11 Radiocontrol del vehículo

- **Control del motor y regulación de velocidad**

El control del motor de tracción se realiza directamente desde la placa electrónica central, que incorpora un regulador de velocidad integrado. Este regulador permite variar la velocidad y el sentido de giro del motor en función de las órdenes recibidas desde el mando, tal como se recoge en la Figura 3-12.

El sistema está diseñado para ofrecer un funcionamiento sencillo y fiable, sin incorporar funciones avanzadas como control progresivo de aceleración, limitación de par o protección detallada frente a sobrecargas. A pesar de ello, el comportamiento del vehículo resulta estable para su uso previsto, con una respuesta directa a las órdenes del operador.

La ausencia de un regulador de velocidad independiente limita la posibilidad de sustituir o ampliar el sistema de control sin modificar la placa original.



Figura 3-12 Motores DC del sistema de tracción del vehículo

- **Sistema de alimentación y distribución eléctrica**

La alimentación del vehículo se realiza mediante una batería recargable, conectada directamente a la placa electrónica central. Desde esta placa se distribuye la energía hacia el motor, el sistema de radiocontrol y los elementos auxiliares.

El sistema de distribución eléctrica es sencillo y no incorpora módulos específicos de gestión de energía. No se dispone de sensores que permitan conocer el estado de la batería ni de sistemas de protección avanzados frente a descargas profundas. Esta simplicidad es coherente con el uso recreativo del vehículo, aunque limita el control sobre la autonomía y la seguridad del sistema.

La ubicación de la batería, en una posición baja del chasis, contribuye a mantener un centro de gravedad reducido, favoreciendo la estabilidad del conjunto durante el desplazamiento.

- **Sistemas auxiliares: iluminación**

El vehículo incorpora un sistema de iluminación basado en diodos LED, alimentado y controlado desde la misma placa electrónica. Las luces se activan de forma conjunta y no permiten un control individualizado ni adaptativo.

Este sistema cumple una función principalmente estética y de visibilidad básica, sin estar integrado con sensores ni con el sistema de control del vehículo. Desde el punto de vista del proyecto, la iluminación original no aporta información relevante para tareas de vigilancia o reconocimiento.

- **Cableado y disposición interna**

El cableado del sistema es mínimo y está diseñado exclusivamente para los componentes originales del vehículo. Los cables conectan la placa central con el motor, la batería, los LED y los interruptores básicos, sin previsión de ampliación.

La disposición interna del cableado es funcional, pero no está pensada para la integración de nuevos dispositivos ni para facilitar el mantenimiento. Este aspecto supone una limitación clara de cara a la adaptación del vehículo como UGV.

3.3.4 Prestaciones y limitaciones de la configuración de serie

El JJRC C8812, en su configuración de serie, ha sido diseñado para un uso recreativo. En consecuencia, su arquitectura mecánica y electrónica responde a criterios de simplicidad, bajo coste y facilidad de utilización en operación a corta distancia. En este apartado se describen las prestaciones que proporciona el vehículo sin modificaciones y las limitaciones que presenta cuando se plantea su adaptación como UGV orientado a tareas de vigilancia y reconocimiento.

3.3.4.1 Capacidad de movimiento y maniobrabilidad

Desde el punto de vista de la movilidad, el empleo de orugas laterales aporta una capacidad de tracción adecuada sobre superficies irregulares y facilita la maniobra en espacios reducidos. El giro se obtiene mediante la actuación diferencial de ambos lados, lo que permite realizar cambios de dirección con radios muy reducidos y ejecutar correcciones de trayectoria con rapidez. Esta característica constituye un punto favorable como plataforma base, ya que el desplazamiento todoterreno y la capacidad de maniobra son requisitos esenciales en un UGV de pequeño tamaño.

No obstante, el sistema de control original está orientado a un manejo directo y básico, sin posibilidades de ajuste del comportamiento. La respuesta del vehículo se limita a órdenes de avance, retroceso y giro, sin mecanismos que permitan configurar la progresividad de la aceleración, el frenado o la sensibilidad del mando. Esta limitación no es crítica en un empleo recreativo, pero reduce la precisión de conducción cuando se requiere un desplazamiento controlado y estable, especialmente a baja velocidad, que es habitual en tareas de observación y reconocimiento.

3.3.4.2 Estabilidad y comportamiento dinámico

La estabilidad general del vehículo es adecuada para su finalidad de serie, favorecida por una configuración compacta y por la ubicación de la batería en una zona inferior del chasis, lo que contribuye a mantener un centro de gravedad relativamente bajo. La geometría de las orugas y los elementos de apoyo permiten un contacto continuo con el terreno y facilitan el avance sobre irregularidades de pequeña entidad.

Sin embargo, para un empleo como plataforma de vigilancia y reconocimiento resulta relevante el comportamiento dinámico sobre terreno irregular. La configuración original no incorpora elementos de control ni de supervisión que permitan suavizar vibraciones, limitar oscilaciones o mantener una respuesta constante ante cambios de adherencia. En un uso recreativo esta carencia es asumible, pero en un escenario de operación con cámara y teleoperación prolongada puede afectar tanto a la precisión de conducción como a la calidad de la información visual obtenida, al aumentar la presencia de movimientos bruscos y vibraciones.

3.3.4.3 Alimentación y autonomía en la configuración de serie

El sistema de alimentación del vehículo está dimensionado para abastecer únicamente los consumos propios de la configuración original, centrados principalmente en la tracción y en algunos sistemas auxiliares de baja demanda. Por ello, la autonomía está orientada a sesiones de funcionamiento relativamente cortas y depende de factores como el tipo de terreno y el régimen de uso. Para el objetivo de este trabajo, la consideración principal es que la integración de nuevos subsistemas tales como una controladora, módulos de comunicaciones mejorados o un sistema de visión incrementará el consumo total y requerirá una distribución energética más robusta y planificada para garantizar un suministro estable a todos los elementos.

3.3.4.4 Limitaciones de control, supervisión y ampliación

Las principales limitaciones para la adaptación del JJRC C8812 como UGV más avanzado se concentran en su parte electrónica. El vehículo emplea una placa central altamente integrada que agrupa funciones de recepción de radio, control de motor y distribución básica de energía. Esta solución simplifica el conjunto y reduce el número de componentes, pero dificulta la modificación del sistema, ya que no permite sustituir o ampliar de forma modular los distintos subsistemas.

Asimismo, el control original se basa en un esquema unidireccional: el operador transmite órdenes, pero el vehículo no proporciona información de retorno sobre su estado. Esto limita la supervisión durante la operación, ya que no es posible disponer de datos útiles para evaluar el estado energético o detectar condiciones anómalas de funcionamiento. Adicionalmente, la disposición interna y el cableado están diseñados específicamente para los componentes de serie, sin previsión de integración ordenada

de módulos adicionales, lo que condiciona la accesibilidad, el mantenimiento y la ampliación del sistema.

3.4 Propuesta de UGV

Tras el análisis del vehículo en su configuración de serie, se define la solución propuesta con el fin de disponer de una plataforma de bajo coste orientada a teleoperación y ampliable para tareas de observación y reconocimiento. La propuesta se apoya en una idea principal: se mantiene la base mecánica (chasis, transmisión y movilidad por orugas) y se reemplaza el sistema de control original por una arquitectura modular basada en una controladora Pixhawk 2.4.8 con firmware ArduRover, configurada mediante Mission Planner. Esta aproximación permite pasar de un sistema cerrado, con escasa capacidad de ajuste, a un sistema parametrizable y preparado para incorporar subsistemas adicionales.

3.4.1 Requisitos funcionales y operativos

La configuración propuesta se ha definido a partir de requisitos prácticos acordes con el alcance del proyecto y con el propósito del sistema, orientado a tareas de reconocimiento y vigilancia en un entorno controlado.

En primer lugar, se considera imprescindible la teleoperación estable y precisa, entendida como la capacidad de gobernar el vehículo de forma manual con un mando de radiocontrol con mayor precisión y con calibración de canales. Este requisito implica que el sistema debe permitir ajustar el rango de mando, el centrado y el sentido de actuación de las órdenes de control, de modo que la respuesta del vehículo sea consistente y repetible.

En segundo lugar, se plantea la necesidad de configurabilidad y ampliación. El sistema debe permitir modificaciones posteriores sin depender de una placa original única, facilitando la integración progresiva de nuevos elementos. Este requisito justifica el uso de una controladora con firmware específico para vehículos terrestres, que permita ajustar parámetros y asignar funciones a entradas y salidas.

En tercer lugar, se considera imprescindible incorporar criterios de seguridad de operación. En este contexto, significa que el sistema debe incluir mecanismos que reduzcan riesgos ante situaciones como la pérdida de señal del mando. Por ello se contempla la configuración de un comportamiento de seguridad (*failsafe*) y la existencia de un modo de control manual como referencia principal.

Finalmente, se establece como requisito de diseño la integración de visión, de manera que el UGV incorpore un sistema de captura y transmisión de imagen basado en Raspberry Pi, sin alterar el núcleo de control del vehículo.

3.4.2 Arquitectura del sistema propuesto

La arquitectura propuesta se organiza en subsistemas para clarificar la función de cada elemento y su relación con el conjunto: movilidad, control, comunicaciones, actuación, alimentación y percepción.

3.4.2.1 Movilidad y tracción

Se mantiene la base mecánica del JJRC C8812, con tracción por orugas y maniobra mediante variación diferencial de velocidad entre ambos lados. Esta decisión permite aprovechar una base ya funcional, reduciendo costes y tiempo de fabricación. La movilidad por orugas se considera adecuada para el objetivo del proyecto, ya que ofrece buena tracción y maniobrabilidad a baja velocidad, características de interés en tareas de reconocimiento y vigilancia.

3.4.2.2 Sistema de control

El núcleo de control lo constituye la controladora Pixhawk 2.4.8 ejecutando ArduRover. La Pixhawk recibe las órdenes del operador a través del receptor de radio, procesa dichas órdenes conforme a los parámetros configurados y genera señales de salida hacia el subsistema de actuación. La configuración

se realiza mediante *Mission Planner*, lo que permite calibración de entradas, asignación de salidas y parametrización del comportamiento sin intervención física sobre la electrónica.

3.4.2.3 Comunicaciones (mando y receptor)

Se sustituye el radiocontrol original por un enlace basado en emisora y receptor. En el montaje empleado se utiliza un receptor FS-iA6B (*FlySky*), que entrega a la Pixhawk las señales de mando. Esta sustitución elimina la dependencia de la placa original y habilita el uso de canales auxiliares para funciones adicionales, así como la calibración completa de la entrada de radio.

3.4.2.4 Actuación sobre la tracción

Para materializar la orden de movimiento, la Pixhawk genera señales de control que se envían al sistema encargado de gobernar los motores. En el montaje se contempla un controlador de motores conectado al conjunto motor-transmisión. Además, se emplea una electrónica intermedia basada en microcontrolador (tipo Arduino Nano) como elemento de adaptación cuando es necesario convertir o adecuar las señales entre la controladora y el *driver*. Esta solución permite mantener el diseño flexible, especialmente al trabajar con componentes comerciales que no siempre comparten exactamente el mismo tipo de entrada de control.

3.4.2.5 Sensores y referencia de posición

La arquitectura incluye la posibilidad de integrar un módulo externo de GPS con compás, conectado a la Pixhawk. Este módulo no es imprescindible para la teleoperación manual, pero se incorpora como preparación para futuras funciones de asistencia o registro de trayectoria, y para disponer de una referencia de orientación si se habilitan modos más avanzados. Su integración queda prevista en el diseño y puede activarse cuando el entorno de operación y el montaje final lo permitan.

3.4.2.6 Sistema de alimentación

La alimentación se realiza mediante una batería LiPo, adoptando una distribución que separa dos necesidades diferenciadas: por un lado, la alimentación de la electrónica de control y, por otro, la alimentación de la etapa de potencia asociada a la tracción. La Pixhawk se alimenta a través de su entrada específica (*POWER*), mientras que el controlador de motores se alimenta directamente desde la línea de potencia. Esta separación reduce el riesgo de inestabilidad en la electrónica cuando los motores demandan corrientes elevadas y favorece una integración más robusta del sistema.

Asimismo, se descarta el uso de la batería original del vehículo y se opta por una batería de mayor capacidad con el objetivo de incrementar la autonomía. Esta modificación implica reubicar el sistema de almacenamiento energético respecto al diseño de serie, liberando el volumen interno originalmente dedicado a la cavidad de la batería. Como consecuencia, se incrementa el espacio disponible para la integración y ordenado de la electrónica adicional (Arduino Nano y controlador Cytron), aspecto que se materializa en el rediseño del chasis interior descrito en el apartado de modelado CAD.

3.4.2.7 Sistema de visión

Se incorpora una Raspberry Pi 4B como subsistema auxiliar destinado a gestionar la capacidad de visualización remota del vehículo, junto con una cámara USB y el dispositivo para recibir la imagen. Su integración se plantea de forma independiente respecto al sistema de control del movimiento, de manera que la Pixhawk mantiene en todo momento el control principal del vehículo, mientras que la Raspberry Pi asume exclusivamente las funciones asociadas a la captura, procesamiento y retransmisión de vídeo dotando al UGV de capacidad FPV.

3.4.3 Comparativa entre configuración original y configuración propuesta

La configuración original del vehículo integra en una única placa original la recepción de radio, el control del motor y la distribución básica de energía. Esta solución resulta adecuada para uso recreativo,

pero limita la modificación del comportamiento, la incorporación de nuevos módulos y el diagnóstico del sistema.

En la configuración propuesta se adopta una arquitectura modular en la que el radiocontrol, el control y la potencia quedan desacoplados. El uso de Pixhawk con ArduRover introduce capacidad de parametrización mediante *Mission Planner*, permitiendo calibración del mando y asignar funciones a canales. Esto aporta una mejora directa en el control manual y habilita una plataforma que puede evolucionar sin depender de una electrónica cerrada. Asimismo, la sustitución del enlace original por un receptor compatible aporta estabilidad en la entrada de control y facilita la utilización de canales auxiliares.

3.5 Modelado CAD del vehículo

En este apartado se describe el proceso seguido para el modelado CAD del vehículo mediante Autodesk Inventor. Se parte de la plataforma real como referencia geométrica, estableciendo el método empleado para la toma de medidas y la reconstrucción del chasis, y se presentan posteriormente las piezas diseñadas y su integración en ensamblajes parciales y finales. El objetivo es disponer de un modelo digital coherente que permita documentar el diseño, comprobar el encaje entre componentes y generar una representación completa del UGV desarrollado.

3.5.1 Criterios generales

El modelado CAD del UGV se ha realizado a partir de la plataforma base JJRC C8812, empleando como referencia las piezas reales del vehículo. El objetivo no ha sido únicamente reproducir la geometría existente, sino generar un conjunto digital que permitiera comprender la arquitectura del vehículo, rediseñar elementos para alojar nueva electrónica y preparar un ensamblaje final coherente para su representación y análisis. Para ello, la estrategia seguida se organiza en cuatro etapas: definición de una referencia principal, establecimiento del criterio interior/exterior, modelado pieza a pieza con validación progresiva y, por último, preparación del conjunto para su representación final.

En primer lugar, se adopta como referencia geométrica principal el chasis del vehículo, al ser el elemento estructural que condiciona el posicionamiento del sistema de tracción y el espacio disponible para la integración de electrónica y batería. A partir de esta referencia se establecen ejes y planos de trabajo comunes, que permiten mantener la consistencia dimensional a lo largo de todo el proyecto.

En segundo lugar, el conjunto se estructura según un criterio funcional de piezas exteriores y piezas interiores. Las piezas exteriores corresponden al subsistema de movilidad por orugas (ruedas conducidas superiores e inferiores, rueda conductora, rueda tensora, oruga y elementos asociados como la amortiguación), cuyo diseño está condicionado por el contacto con el terreno y por la geometría de engrane. Las piezas interiores agrupan el rediseño del chasis inferior y los elementos destinados a integrar la electrónica y la alimentación (cavidad de batería, transmisión y plataformas internas), priorizando accesibilidad, ordenado del cableado y posibilidades de ampliación.

En tercer lugar, el desarrollo se realiza mediante un enfoque de modelado incremental. Cada pieza se construye de forma individual a partir de su referencia real, se define con operaciones paramétricas y se incorpora inmediatamente a su ensamblaje parcial para validar posicionamiento, holguras e interferencias. Esta validación continua evita acumular errores y permite ajustar cada elemento antes de avanzar al siguiente.

Finalmente, una vez completados los subconjuntos, se genera el ensamblaje global del vehículo, incorporando las restricciones necesarias para representar el comportamiento real en aquellas partes móviles (giro de ruedas, ajuste de la rueda tensora y recorrido del sistema de amortiguamiento). El conjunto resultante se utiliza como base para el renderizado final.

3.5.2 Toma de medidas y reconstrucción geométrica

El punto de partida del modelado ha sido la geometría real del vehículo. Dado que el chasis presenta superficies curvas, nervaduras y zonas con difícil acceso para medición directa, la toma de medidas se ha realizado combinando medición manual (pie de rey) con un proceso de escaneo, utilizado como referencia geométrica para mejorar la aproximación de la forma global.

En primer lugar, se obtuvieron cotas de control mediante medición directa (longitudes totales, anchuras, distancias entre ejes, posiciones de taladros y apoyos). Estas cotas se emplearon para garantizar consistencia dimensional y para verificar el ajuste del modelo.

A continuación, se generó una referencia por escaneo cuya función principal fue servir como guía para reconstruir la envolvente del chasis y las transiciones complejas. En *Inventor*, dicha referencia se alineó y escaló utilizando las cotas de control, y se utilizó como apoyo para definir planos de sección y perfiles representativos. Sobre estos perfiles se construyó el modelo mediante operaciones paramétricas (extrusión, revolución, vaciado y redondeos), asegurando que la geometría final fuese editable y no dependiera directamente de la malla del escaneo.

Como resultado, tal como se muestra en la Figura 3-13, se obtuvo un chasis CAD coherente, que actúa como base de referencia para el posicionamiento del sistema de tracción y, especialmente, para el diseño de elementos internos destinados a la integración de electrónica y baterías.

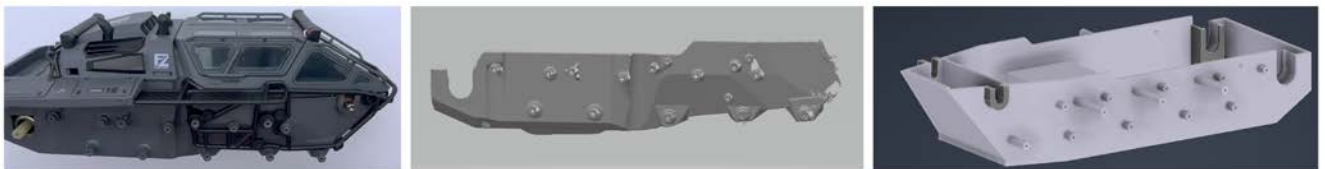


Figura 3-13 Proceso de reconstrucción del chasis: (izquierda) chasis original del vehículo, (centro) geometría obtenida mediante escaneo como referencia, y (derecha) modelo final reconstruido en Autodesk Inventor.

3.5.3 Piezas diseñadas en Autodesk Inventor

Las piezas diseñadas se presentan diferenciando entre piezas exteriores y piezas interiores. En todos los casos se sigue la misma secuencia:

referencia real → proceso de modelado en Inventor → resultado CAD

3.5.3.1 Piezas exteriores: sistema de tracción por orugas

- **Ruedas conducidas superiores**

Para el modelado de las ruedas conducidas superiores se tomó como referencia el conjunto real de ruedas de rodadura. El proceso comenzó con la obtención de las dimensiones principales (diámetro exterior, ancho y alojamiento del eje), que se trasladaron a un croquis base en *Autodesk Inventor*. A partir de este perfil se generó el sólido principal mediante una operación de revolución, obteniendo la geometría general de la rueda. Posteriormente se incorporaron los elementos funcionales necesarios para su montaje y funcionamiento, como rebajes, radios y el asiento del eje, y se aplicaron patrones en aquellas zonas con repetición geométrica. Por último, la pieza se integró en el ensamblaje lateral para comprobar su alineación y el contacto con la oruga. La comparación entre la rueda real y el modelo CAD se presenta en la Figura 3-14.



Figura 3-14 Rueda conducida superior: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD

- **Ruedas conducidas inferiores**

Para el modelado de las ruedas conducidas inferiores se siguió una metodología similar a la empleada en las ruedas superiores, pero considerando además su integración con el elemento de apoyo/amortiguamiento. En primer lugar, se definieron las dimensiones principales de la rueda (diámetro y espesor) y el sistema de montaje sobre su soporte, generando el cuerpo base en *Inventor* y añadiendo posteriormente los detalles necesarios para su fijación. A continuación, la pieza se incorporó al ensamblaje para validar su posición, comprobando especialmente la altura del conjunto respecto al chasis y la compatibilidad con la trayectoria de la oruga. La comparativa entre la pieza real y el modelo CAD se recoge en la Figura 3-15.



Figura 3-15 Rueda conducida inferior: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD

- **Rueda conductora (motriz)**

Para el modelado de la rueda conductora se tomó como referencia la pieza real, prestando especial atención a la geometría de contacto con la oruga, ya que este elemento condiciona directamente la transmisión del movimiento. En *Autodesk Inventor* se generó primero el cuerpo principal a partir de un perfil acotado y una operación de revolución. Posteriormente se añadieron los salientes/dientes responsables del engrane mediante operaciones de extrusión y corte, replicándolos con un patrón circular para asegurar la uniformidad angular. Por último, se definió el alojamiento del eje y se ajustó su unión con la transmisión, comprobando en el ensamblaje la coaxialidad y el centrado. La correspondencia entre la pieza original y el modelo CAD se muestra en la Figura 3-16.



Figura 3-16 Rueda motriz: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD

- **Rueda tensora**

Para el diseño de la rueda tensora se tomó como referencia el conjunto real, incluyendo el mecanismo asociado al guiado y tensado de la oruga. En *Autodesk Inventor* se generó inicialmente la rueda mediante una operación de revolución, reproduciendo su geometría principal. A continuación, se modeló el sistema de montaje vinculado al tensado (soporte y punto de anclaje), de forma que el conjunto pudiera integrarse en el ensamblaje representando su función real. Finalmente, se validó la pieza dentro del conjunto lateral comprobando que la oruga mantiene una trayectoria coherente y que el rango de ajuste disponible no provoca interferencias con el chasis. El resultado se recoge en la Figura 3-17.

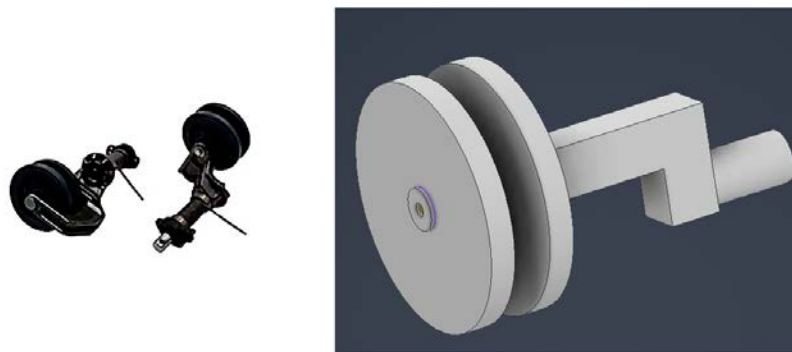


Figura 3-17 Rueda tensora: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD

- **Correa**

Para el modelado de la correa se tomó como referencia la pieza real del vehículo, prestando especial atención a la geometría repetitiva de sus resaltes y a la forma en que se adapta al contorno del sistema de tracción. A diferencia de otras piezas del conjunto, su diseño no se planteó como un único sólido continuo desde el inicio, sino a partir de la creación de un patrón base que reproduce la unidad geométrica repetitiva de la correa.

En *Autodesk Inventor*, se modeló primero ese elemento patrón con las dimensiones y forma características del tramo real. Una vez definida esta geometría base, se procedió a copiarla sucesivamente siguiendo el contorno marcado por la disposición de las ruedas del sistema de tracción. De este modo, la correa se fue construyendo a partir de la repetición ordenada de dicho patrón, adaptándolo al recorrido cerrado que describe alrededor de las ruedas conducidas, la rueda motriz y la rueda tensora.

Este procedimiento permitió obtener una representación funcional de la trayectoria y del volumen general de la correa dentro del ensamblaje, facilitando su ajuste visual respecto al conjunto de tracción. La correspondencia entre la pieza real y el modelo CAD se muestra en la Figura 3-18.

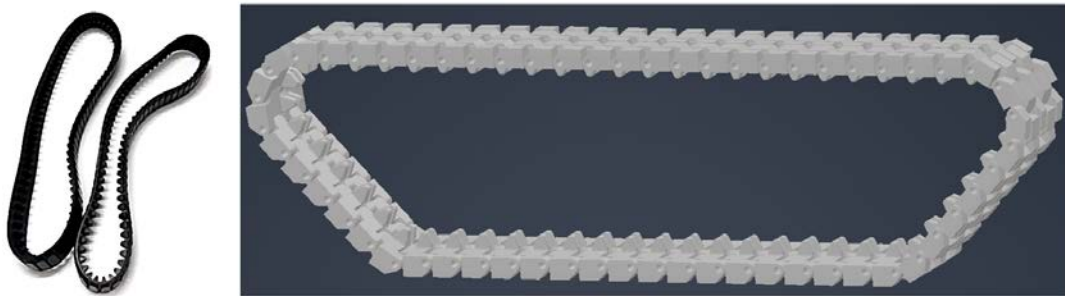


Figura 3-18 Correa: (izquierda) pieza original del vehículo, (derecha) modelo CAD

- **Amortiguamiento de cada rueda conducida inferior**

Para el modelado del elemento de amortiguación se tomó como referencia el sistema real de apoyo elástico y el recorrido asociado a las ruedas inferiores. El objetivo fue, por un lado, representar el componente mecánico con suficiente fidelidad y, por otro, dejar preparado el ensamblaje para definir su rango de movimiento.

En *Autodesk Inventor* se comenzó definiendo el soporte principal y su geometría de unión al chasis, incorporando las superficies de apoyo y las zonas de contacto necesarias para reproducir el montaje real. A continuación, se estableció el eje de movimiento correspondiente (giro o traslación, según el mecanismo), de manera que el conjunto pudiera integrarse en el ensamblaje manteniendo el grado de libertad requerido para simular su funcionamiento. La pieza y su correspondencia con el componente real se presentan en la Figura 3-19.



Figura 3-19 Conjunto de amortiguación de rueda conducida inferior

3.5.3.2 Piezas interiores: estructura e integración de electrónica y alimentación

Las piezas interiores se han diseñado con el objetivo de adaptar el volumen disponible del vehículo a la nueva arquitectura propuesta, facilitando la integración ordenada de la electrónica y de la alimentación, y garantizando al mismo tiempo la compatibilidad con la transmisión y con el resto de los subconjuntos. A diferencia de las piezas exteriores, cuya geometría viene principalmente condicionada por el contacto con el terreno y el engrane con la oruga, las piezas interiores se definen por criterios de accesibilidad, modularidad, fijación fiable y gestión del cableado.

De acuerdo con el criterio referencia–resultado, cada pieza interior se ha modelado partiendo de la pieza física o del espacio real disponible, describiendo el proceso seguido en *Autodesk Inventor* y documentando el resultado mediante las figuras correspondientes.

- **Chasis inferior (integración Arduino Nano y Cytron)**

La pieza real de referencia utilizada para este diseño fue el chasis inferior original del JJRC C8812, al tratarse del elemento que define la estructura base del vehículo y condiciona el espacio útil para alojar componentes internos. En la configuración propuesta, la batería de serie deja de emplearse y se reubica una batería de mayor capacidad en otra zona del vehículo; como consecuencia, el volumen destinado al alojamiento original de batería se considera prescindible y puede aprovecharse para mejorar la integración interna. Esta modificación permite incrementar el espacio disponible para integrar la electrónica adicional y ordenar el cableado sin comprometer el montaje del sistema de tracción.

En *Autodesk Inventor*, el modelado se inicia a partir de la geometría reconstruida del chasis, manteniendo los planos de referencia, los puntos estructurales relevantes y las zonas de apoyo necesarias para el ensamblaje general. A partir de ahí, se elimina el volumen asociado a la cavidad de la batería original y se redefine la geometría interior para generar una zona útil adicional. Sobre esta zona se incorporan superficies de apoyo, taladros o puntos de fijación destinados a alojar de forma estable el *Arduino Nano* y el controlador *Cytron*, considerando holguras, accesibilidad a conectores y rutas de paso del cableado.

De forma simultánea, el diseño debe garantizar la compatibilidad con la transmisión, ya que este subconjunto queda ubicado en el interior y requiere mantener alineaciones y espacios libres específicos. Por ello, durante el modelado se reservan los volúmenes necesarios para ejes y elementos de transmisión, verificando en ensamblaje que no se producen interferencias con los soportes añadidos para electrónica tal y como se aprecia en la Figura 3-20.

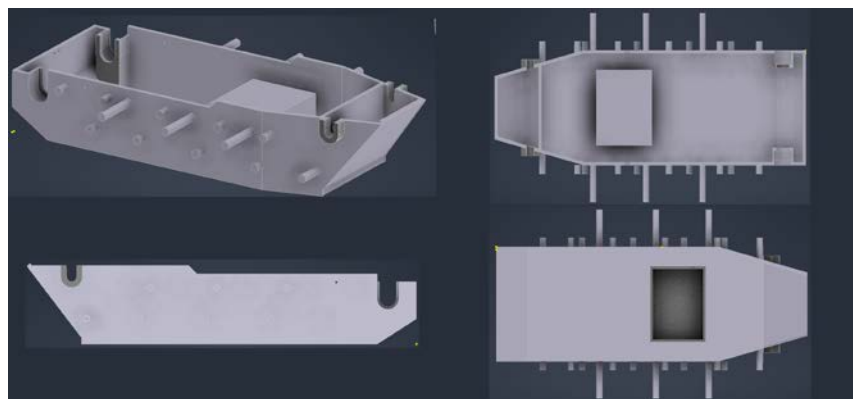


Figura 3-20 Vistas del chasis inferior modelado en Autodesk Inventor

- **Cavidad de la batería original**

Aunque en la configuración propuesta no se mantiene la batería de serie, el alojamiento original se ha considerado una referencia relevante durante el proceso de diseño, ya que define un volumen interno significativo del vehículo y condiciona la redistribución de elementos. En el modelo CAD se representa dicha cavidad en la fase de reconstrucción del chasis, lo que permite cuantificar el espacio liberado y justificar geoméricamente la reorganización interna.

Posteriormente, este volumen se elimina en el rediseño del chasis inferior para ampliar el área disponible para integración. De este modo, la cavidad original no se incorpora como elemento funcional final, pero sí forma parte del proceso de modelado como referencia que permite documentar la transformación del interior del vehículo.

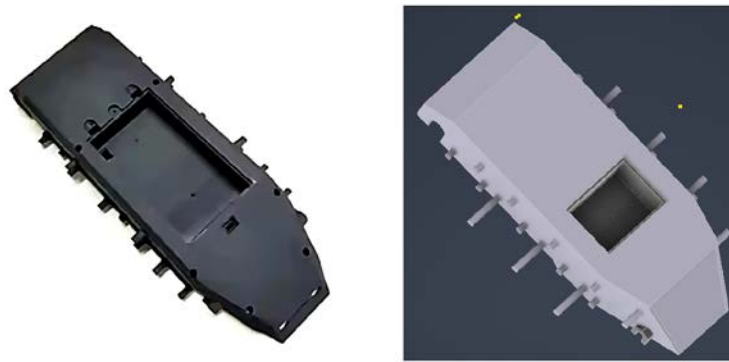


Figura 3-22 Cavity of the battery

- **Transmisión**

Para el modelado de la transmisión se tomó como referencia el conjunto real, con el objetivo de disponer de un subconjunto digital que permitiera comprobar de forma fiable las alineaciones, los encajes y las holguras disponibles dentro del chasis. El nivel de detalle se ajustó al propósito del trabajo, representando con fidelidad aquellos elementos que condicionan el espacio interior y la conexión mecánica con la rueda conductora.

El proceso en *Autodesk Inventor* comenzó con la definición de ejes de referencia y planos de trabajo comunes, sobre los que se modelaron los elementos principales del sistema (ejes, engranajes o componentes equivalentes, según la configuración real). Una vez construido el subconjunto, se integró en el ensamblaje interior para verificar su compatibilidad con el chasis rediseñado y con los soportes previstos para la electrónica, asegurando que la reorganización del interior no afecta al funcionamiento mecánico. La correspondencia entre el conjunto real y el modelo CAD se recoge en la Figura 3-21.

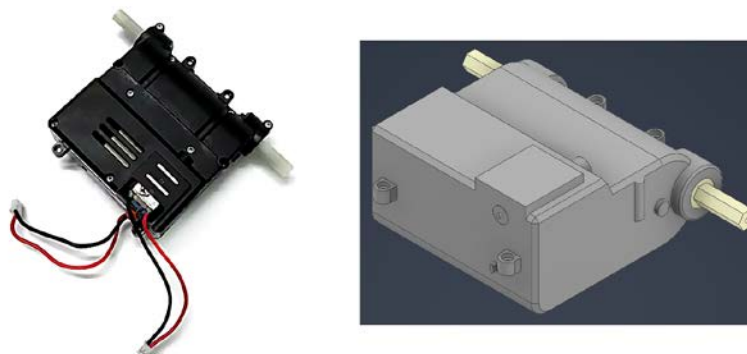


Figura 3-21 Caja de transmisión

- **Plataforma base**

La plataforma base se ha diseñado como el elemento estructural interior que permite organizar el primer nivel de integración del sistema, destinado principalmente a la Pixhawk y a la batería principal. Su función no es únicamente servir de soporte físico, sino también ordenar la instalación y facilitar el mantenimiento, evitando que la electrónica quede apoyada directamente sobre el chasis o dependa de fijaciones improvisadas.

El diseño parte del volumen disponible en el interior del vehículo y de los puntos estructurales del chasis que permiten una fijación estable. En *Autodesk Inventor* se define la base mediante croquis acotados y operaciones de extrusión, ajustando dimensiones para garantizar holguras con la transmisión y con el resto de los elementos interiores.

Un aspecto clave considerado desde el inicio es la gestión del cableado. La ubicación de la Pixhawk y la batería implica la presencia de cables de distinta naturaleza, por lo que la plataforma se ha diseñado contemplando rutas de paso y puntos de salida. En consecuencia, se han incorporado orificios y ranuras distribuidos estratégicamente, que permiten guiar el cableado hacia los laterales o hacia niveles superiores sin generar cruces innecesarios, tensiones sobre conectores ni interferencias con piezas móviles. Esta perforación de la plataforma no se realiza de forma arbitraria, sino en función de la posición prevista de cada componente y del recorrido más directo y seguro de sus conexiones.

Además, la plataforma incluye puntos de fijación para la Pixhawk y para el sistema de sujeción de la batería, de manera que ambos elementos queden inmovilizados y con acceso razonable para conexión/desconexión. La validación se realiza incorporando la plataforma al ensamblaje interior y verificando la accesibilidad a conectores, holguras suficientes para el cableado, ausencia de interferencias con transmisión y chasis, y coherencia con la segunda planta de integración. Todo esto se puede ver reflejado en la Figura 3-22

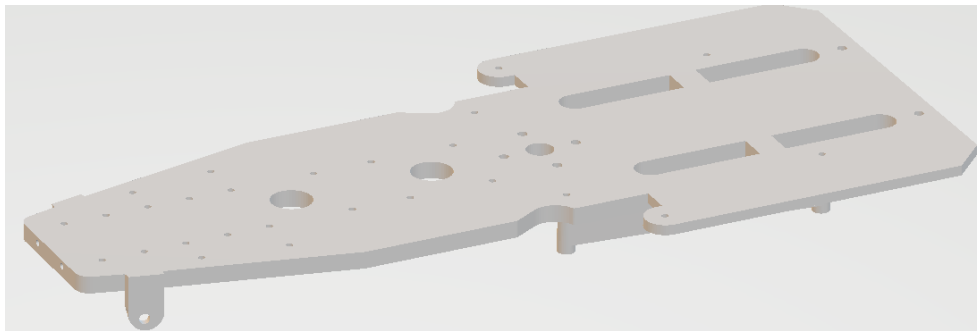


Figura 3-22 Plataforma base

- **Plataforma 2ª planta**

La plataforma de segunda planta se plantea como un nivel superior destinado a integrar el subsistema de visión y comunicaciones, separándolo físicamente de la electrónica de control y de la etapa de potencia. En esta plataforma se prevé el montaje de la Raspberry Pi 4B, el receptor de radiocontrol, el módulo GPS y la cámara, garantizando accesibilidad, fijación estable y rutas de cableado hacia la Pixhawk y la alimentación.

El modelado en Inventor parte de la definición del volumen disponible bajo la carrocería y de los puntos de anclaje existentes o diseñados en el chasis. Se construye una bandeja con soportes específicos y con un patrón de fijación compatible con varios componentes, teniendo en cuenta los orificios para cableado. Finalmente, se valida el montaje en ensamblaje verificando interferencias con la carrocería y asegurando que la estructura mantiene la separación entre subsistemas, tal y como se aprecia en la Figura 3-23.

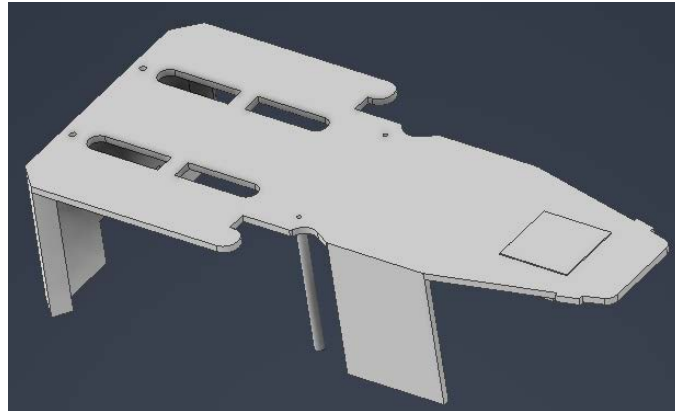


Figura 3-23 Plataforma de la segunda planta

3.5.3.3 Componentes electrónicos

Además de las piezas estructurales, se han modelado en Autodesk Inventor los principales componentes electrónicos empleados en el sistema: Pixhawk 2.4.8, Raspberry Pi 4B, receptor, módulo GPS y cámara. El objetivo de estos modelos no es únicamente visual, sino funcional dentro del proceso de diseño: permitir verificar volúmenes, definir orificios de fijación, asegurar holguras para conectores y planificar de forma realista rutas de cableado entre niveles.

Para todos los componentes se ha seguido un criterio de modelado consistente: se parte de la geometría real, se modela el volumen principal mediante extrusión y operaciones sencillas, se incorporan taladros o referencias de anclaje, y se añaden volúmenes de reserva en conectores cuando estos condicionan el diseño. Finalmente, cada componente se integra en el ensamblaje interior como pieza realista de referencia.

- **Pixhawk 2.4.8**

Para representar la controladora Pixhawk 2.4.8 dentro del ensamblaje no se realizó un modelado propio desde cero, sino que se empleó un modelo CAD obtenido de la plataforma abierta GrabCAD [39]. La elección de este recurso responde a una cuestión práctica, ya que el objetivo en esta fase no era rediseñar el componente, sino disponer de una geometría con dimensiones suficientemente fieles al tamaño real que permitiera integrarlo correctamente en la plataforma desarrollada en *Autodesk Inventor* y comprobar el volumen que ocupaba dentro del conjunto.

El uso de este tipo de modelos facilitó la colocación de la controladora en el ensamblaje y la verificación de aspectos como su encaje, su posición sobre la plataforma base, la ocupación del espacio disponible y las holguras necesarias para el conexionado. De este modo, el modelo CAD de la Pixhawk se empleó como una referencia dimensional útil para la integración del sistema, permitiendo trabajar con una representación realista del componente sin necesidad de dedicar tiempo adicional a su reconstrucción geométrica. El resultado se muestra en la Figura 3-24, donde se compara el componente real con el modelo CAD utilizado en el ensamblaje.

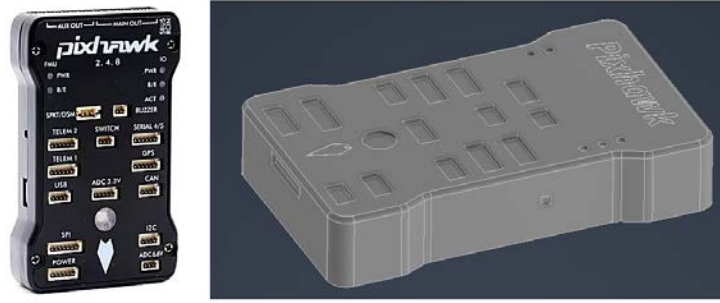


Figura 3-24 Pixhawk 2.4.8

- **Raspberry pi 4B**

En el caso de la Raspberry Pi 4B, el modelo incorporado al ensamblaje no fue elaborado de forma propia, sino obtenido a partir de un diseño disponible en GrabCAD [39]. La razón de emplear este recurso fue disponer de una referencia geométrica ya definida, con unas dimensiones suficientemente próximas a las reales, que permitiese situar la placa dentro del conjunto y comprobar de forma fiable el espacio que requería en la plataforma de segunda planta.

Más que centrarse en la reconstrucción detallada del componente, el interés en esta fase estaba en su integración dentro del vehículo. Contar con un modelo CAD previamente disponible facilitó la comprobación del volumen ocupado por la placa, la posición relativa de sus conectores y la relación de estos con el resto de los elementos próximos. Esto resultó especialmente útil para valorar la accesibilidad al conexionado y para prever el espacio necesario para alimentación, transmisión de datos y salida de vídeo.

La comparativa entre la placa real y el modelo CAD empleado se presenta en la Figura 3-25.



Figura 3-25 Raspberry Pi 4B

- **Receptor**

En el caso del receptor FS-iA6B, también se utilizó un modelo CAD como referencia para incorporarlo al ensamblaje y poder situarlo con unas dimensiones coherentes dentro del vehículo. El interés principal no estaba en reproducir el componente con detalle, sino en disponer de una representación suficiente para comprobar su ubicación, su orientación y el espacio necesario para el conexionado. Esto permitió tener en cuenta la salida de cables, la accesibilidad a los puertos laterales y la posición de las antenas durante la integración del sistema. El resultado se recoge en la Figura 3-26, donde se compara el receptor real con el modelo CAD de GrabCad.

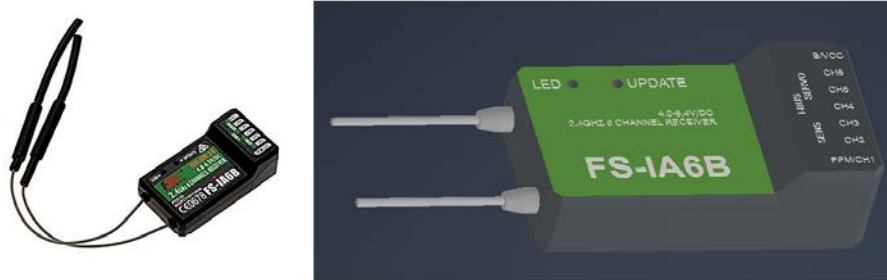


Figura 3-26 Receptor FS-IA6B

- **GPS**

Para el diseño del módulo GPS se ha tomado como referencia el componente comercial empleado en el sistema, reproduciendo su forma y dimensiones en *Autodesk Inventor* con el objetivo de disponer de una representación fiable dentro del ensamblaje del vehículo. El modelado se inicia con la creación del cuerpo principal, definiendo la geometría exterior y su espesor para aproximar la carcasa real. A continuación, se incorpora el punto de salida del cableado, representando el paso de cable y la orientación prevista de la conexión hacia la Pixhawk, ya que esta condición influye directamente en el encaminamiento del cable y en el espacio disponible en la segunda planta.

Posteriormente, se añaden los detalles necesarios para mejorar la identificación y el realismo del componente dentro del conjunto, como el contorno de la base y elementos característicos del encapsulado. El resultado final permite comprobar interferencias con la carrocería y validar su ubicación en la plataforma superior. La comparativa entre el módulo real y el modelo CAD se muestra en la Figura 3-27.



Figura 3-27 GPS

3.5.3.4 Integración plataforma base Pixhawk y batería

La plataforma base constituye el primer nivel de integración del sistema y se destina a alojar los elementos que forman el núcleo del control del vehículo: la Pixhawk 2.4.8 y la batería principal. La Pixhawk se sitúa en una zona centrada y protegida para facilitar el acceso a sus conectores durante el montaje y las tareas de verificación, utilizando como referencia el modelo CAD del componente para asegurar compatibilidad dimensional y holguras de conexión. Esta plataforma se apoya sobre la geometría del chasis inferior rediseñado, cuya configuración general y puntos de referencia se documentan en la Figura 3-28.

La batería principal se integra en el mismo nivel con criterios de estabilidad y seguridad, priorizando una colocación que no penalice el centro de gravedad del conjunto. Dado que el sistema abandona la batería de serie y adopta una de mayor capacidad, la integración se plantea de forma independiente al alojamiento original, lo que permite reorganizar el interior y liberar volumen para el resto de los

elementos. En conjunto, la plataforma base concentra los elementos principales y permite una distribución de cableado ordenada hacia la etapa de potencia y hacia el nivel superior.

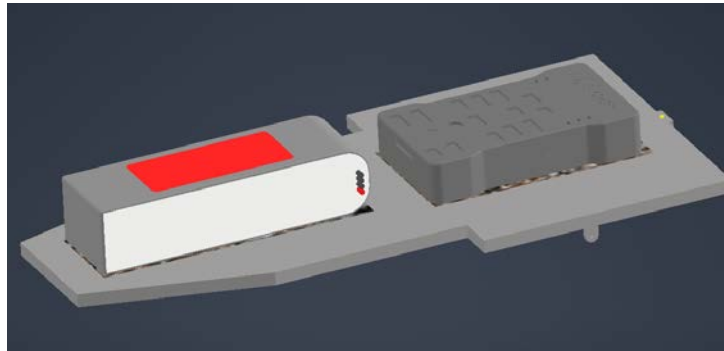


Figura 3-28 Plataforma base-pixhawk-batería

3.5.3.5 Integración plataforma 2ª planta con Raspberry Pi, cámara, receptor y GPS

La plataforma de segunda planta se plantea como un nivel superior destinado a agrupar el subsistema de percepción y comunicaciones, integrando la Raspberry Pi 4B, el receptor FS-iA6B y el módulo GPS, además del elemento de captura de imagen. Esta separación respecto al primer nivel permite alejar estos componentes de la zona de potencia y mejorar la accesibilidad para montaje, sustitución y futuras ampliaciones.

La Raspberry Pi se ubica como elemento central del nivel superior, garantizando acceso a conectores laterales y facilitando el encaminamiento del cableado hacia el sistema de visión y alimentación, utilizando como referencia el modelo CAD del componente para asegurar que no existan interferencias y que las conexiones puedan realizarse sin forzar cables. El receptor se integra en este nivel con el objetivo de mantener las señales de control ordenadas y alejadas de la potencia, apoyándose igualmente en su modelo CAD para validar orientación, holguras y accesibilidad del cableado de señal. Por último, el módulo GPS se sitúa en una posición superior con el fin de favorecer una instalación despejada y minimizar apantallamientos, tomando como referencia su representación CAD para comprobar compatibilidad volumétrica dentro del conjunto.

La integración entre plantas se puede apreciar en la Figura 3-29, Figura 3-29 donde se resuelve mediante rutas de paso definidas que conectan el nivel superior con el inferior, permitiendo que el cableado del receptor y del GPS alcance la Pixhawk sin cruces innecesarios y manteniendo una separación funcional entre señal y potencia.



Figura 3-29 Integración de los componentes en la segunda planta

3.5.3.6 Integración conjunta entre plataformas

La distribución en dos alturas permite estructurar el interior del vehículo de forma funcional. El nivel inferior concentra el control y la energía, mientras que el nivel superior agrupa percepción y comunicaciones. Este enfoque mejora el orden interno, facilita el mantenimiento y reduce el riesgo de interferencias derivadas de cruzar líneas de alta corriente con señales de control, todo ello sobre la base estructural definida por el chasis inferior rediseñado reflejado en la Figura 3-30.

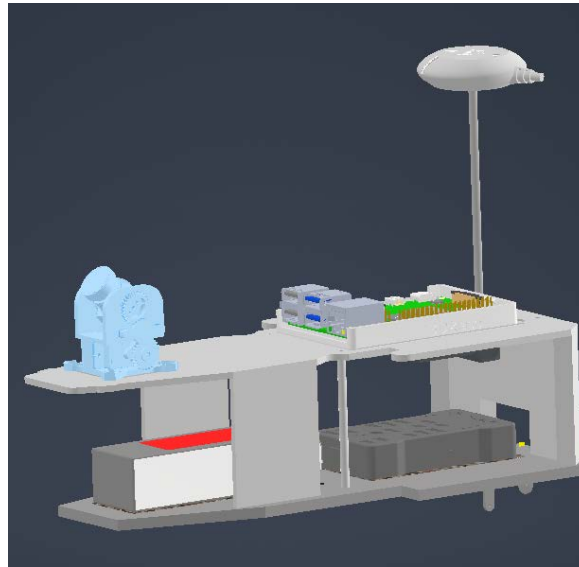


Figura 3-30 Integración conjunta de ambas plataformas

3.5.4 Ensamblaje, restricciones y rangos de movimiento

Una vez modeladas las piezas individuales, se procede a su integración en *Autodesk Inventor* mediante una estructura de ensamblajes progresiva. El objetivo de este apartado es doble: por un lado, comprobar que la geometría generada es coherente y que todas las piezas encajan sin interferencias y por otro, definir las restricciones necesarias para representar de forma realista el comportamiento del conjunto, incluyendo aquellos elementos que presentan movilidad o ajuste.

3.5.4.1 Ensamblaje rueda conducida inferior-amortiguación

El primer subconjunto ensamblado corresponde a la integración de la rueda conducida inferior con su mecanismo de amortiguación. Este conjunto se monta asegurando la relación geométrica entre rueda y soporte, de modo que la rueda quede correctamente posicionada respecto al punto de apoyo y con libertad de giro alrededor de su eje.

Para ello se aplican restricciones de tipo coaxial en el eje de la rueda y restricciones de coincidencia/alineación para fijar la posición del soporte respecto al chasis. La configuración resultante forma parte del conjunto lateral de oruga ya integrado, que puede apreciarse en la Figura 3-31.



Figura 3-31 Ensamblaje amortiguación-rueda

3.5.4.2 Ensamblaje rueda conducida inferior-amortiguación

Una vez validado el subconjunto inferior, se completa el ensamblaje del sistema de tracción integrando el resto de las ruedas y la correa. En esta etapa se incorporan las ruedas conducidas superiores, el conjunto de ruedas inferiores con amortiguación, la rueda conductora y la rueda tensora. Cada rueda se posiciona mediante restricciones de coaxialidad respecto a su eje y restricciones de coincidencia/alineación para fijar su ubicación longitudinal y transversal, manteniendo el grado de libertad de giro necesario para representar su funcionamiento.

Posteriormente se integra la correa, verificando que su trayectoria es consistente alrededor del conjunto y que no se producen colisiones entre elementos durante el giro. El montaje final del subconjunto exterior, con todas las ruedas, amortiguación y oruga en su posición de trabajo, se muestra en la Figura 3-32, donde se aprecia la disposición conjunta y la trayectoria de la correa alrededor del sistema.

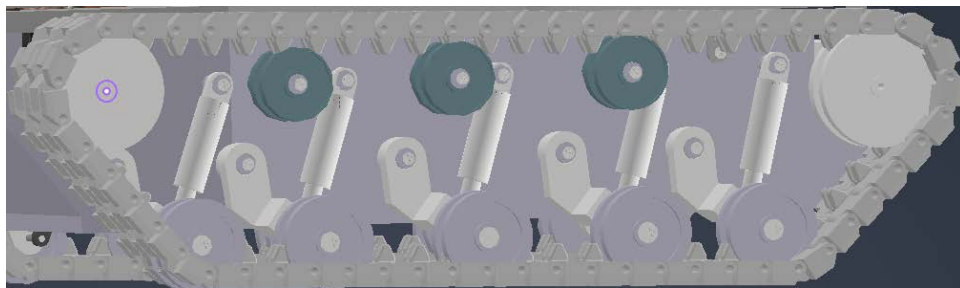


Figura 3-32 Ensamblaje sistema de tracción

3.5.4.3 Integración del sistema de tracción al chasis

Tras la realización del sistema de ruedas y oruga, el subconjunto lateral se integra con el chasis. La ubicación se determina empleando como referencia la geometría reconstruida a partir del escaneo, lo que permite reproducir con mayor fidelidad la posición real de ejes, alojamientos y puntos de fijación. En el ensamblaje, el subconjunto se posiciona utilizando referencias geométricas del chasis (planos, ejes y superficies de apoyo), garantizando alineación y coherencia con la configuración original. El resultado de esta integración del conjunto de tracción sobre el chasis queda documentado en la Figura 3-33.

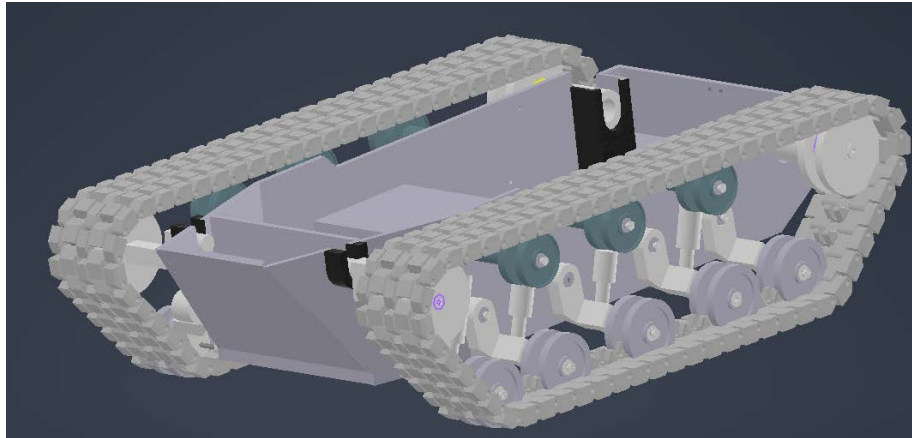


Figura 3-33 Ensamblaje sistema de tracción-chasis

3.5.4.4 Integración interior

En paralelo al sistema de tracción, se integra la transmisión en el interior del chasis asegurando la alineación con el eje de la rueda conductora. La transmisión se posiciona mediante restricciones de coaxialidad y coincidencia respecto a ejes y apoyos, verificando como se observa en la Figura 3-34, que el volumen ocupado es compatible con el chasis rediseñado y que no interfiere con el espacio destinado a la electrónica.

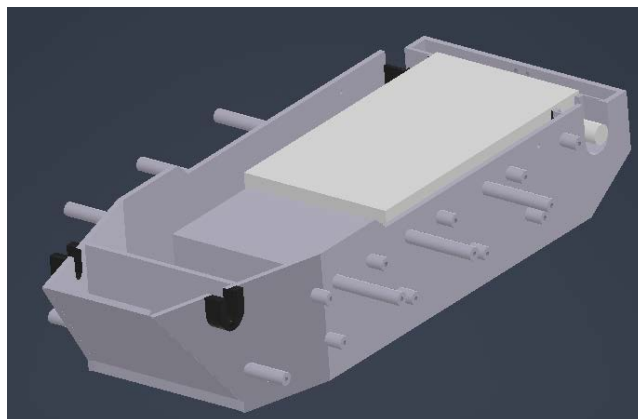


Figura 3-34 Ensamblaje chasis-transmisión

A continuación, se posicionan el *Arduino Nano* y el *Cytron* en la zona prevista del chasis inferior, aprovechando el volumen liberado por la reubicación del sistema de alimentación. El ensamblaje se realiza asegurando superficies de apoyo estables, accesibilidad a conectores y espacio suficiente para el encaminamiento del cableado, como se muestra en la Figura 3-35.

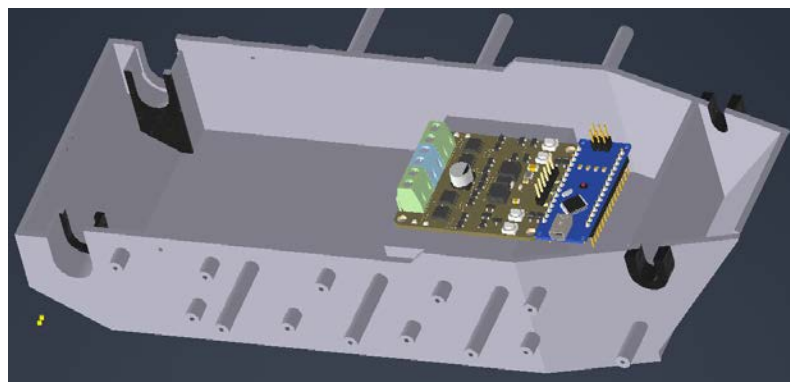


Figura 3-35 Ensamblaje entre chasis-arduino nano-cytron

Posteriormente, como muestra la Figura 3-36, se integra la plataforma base al chasis mediante restricciones rígidas. Sobre esta plataforma se ubican la batería principal y la Pixhawk, verificando holguras para conectores y cableado, y evitando cruces innecesarios entre líneas de potencia y señal.

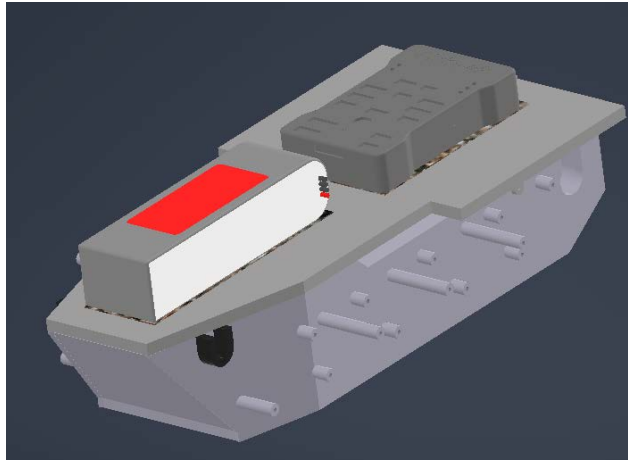


Figura 3-36 Integración componentes-plataforma base

Finalmente, se incorpora la plataforma de segunda planta sobre la plataforma base, consolidando la arquitectura interior en dos alturas; la unión estructural entre chasis y plataforma superior puede observarse en la Figura 3-37.

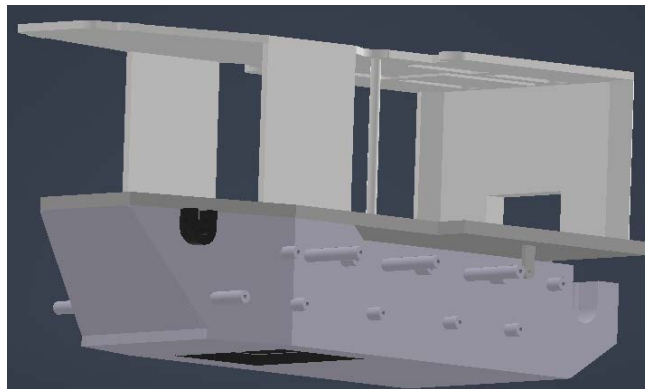


Figura 3-37 Ensamblaje plataforma 2ª planta-plataforma base

3.5.4.5 Integración componentes de la segunda planta

Una vez definida la estructura superior, se integran en la plataforma de segunda planta los componentes del subsistema de percepción y comunicaciones: cámara, receptor, Raspberry Pi 4B y módulo GPS. La validación se realiza atendiendo a la accesibilidad a conectores y mantenimiento, a la compatibilidad volumétrica con el espacio bajo la carrocería y al encaminamiento del cableado hacia el nivel inferior sin interferencias. La configuración interior completa del conjunto, con la integración en doble altura y los componentes situados en su posición, se recoge en la Figura 3-38.



Figura 3-38 Integración componentes con plataformas

3.5.4.6 Restricciones y rangos de movimiento

Además del ensamblaje estático, se han definido restricciones destinadas a representar el movimiento en aquellos elementos donde resulta relevante. Las ruedas se han configurado con libertad de giro alrededor de su eje. Para la rueda tensora, se ha considerado un rango de ajuste limitado, representando su desplazamiento dentro del alojamiento sin permitir posiciones que generen colisión con el chasis o pérdida de trayectoria de la oruga, tal como se ha verificado en el conjunto ensamblado de la Figura 3-33.

En el caso del amortiguamiento asociado a las ruedas inferiores, se ha incorporado el grado de libertad correspondiente y se han establecido límites de recorrido para representar el movimiento máximo permitido. Estos límites se han definido para evitar interferencias y para reflejar la presencia de topes mecánicos, obteniendo un comportamiento consistente dentro del ensamblaje, coherente con la integración mostrada en la Figura 3-39.



Figura 3-39 Grado de movimiento de las ruedas inferiores

Como resultado de esta fase, se obtiene un modelo digital ensamblado que no solo representa la geometría final del vehículo, sino que permite comprobar su viabilidad de montaje y documentar de forma clara el comportamiento de los elementos móviles, dejando el conjunto preparado para su representación final mediante renderizado.

3.5.5 Renderizado del conjunto final

Una vez completado el modelado de las piezas y validada su integración mediante los ensamblajes descritos en el apartado anterior, se ha procedido a generar un renderizado del conjunto con el objetivo de obtener una representación visual clara del UGV desarrollado.

El renderizado se ha realizado a partir del ensamblaje final en *Autodesk Inventor*. En primer lugar, se seleccionó una vista isométrica representativa y se ajustó el encuadre para que el vehículo ocupase la mayor parte del área visible, evitando un exceso de fondo que redujese el nivel de detalle percibido. A continuación, se asignaron apariencias coherentes con los materiales esperables de cada subconjunto, diferenciando superficies plásticas del chasis y plataformas, elementos metálicos en ejes o fijaciones y componentes electrónicos con colores representativos, con el fin de mejorar la lectura del modelo sin introducir un exceso de contraste.

Posteriormente, se accedió al entorno de renderizado de Inventor y se configuró la escena con una iluminación de tipo estudio, buscando una luz uniforme que evitase sombras y resaltase los contornos del modelo. Se seleccionó un fondo neutro, en este caso blanco, por ser el más adecuado visualmente. Una vez definida la escena, se ajustaron los parámetros de calidad del render, incrementando la resolución y el suavizado de bordes para obtener una imagen nítida, especialmente en geometrías repetitivas como la oruga y el conjunto de ruedas.

Finalmente, se ejecutó el renderizado y se exportó la imagen en un formato sin pérdidas que mantuviera el detalle y la fidelidad visual. El resultado final se presenta en la Figura 3-40, donde se observa el UGV ensamblado con la configuración interior en dos alturas y la integración general del sistema de tracción y de los elementos principales del vehículo.



Figura 3-40 Renderizado del UGV

3.6 Reconfiguración del sistema electrónico e integración con Pixhawk (ArduRover)

3.6.1 Análisis de la electrónica de serie

El vehículo parte de una electrónica compacta y cerrada, concentrada en una única placa situada en el interior del chasis Figura 3-10 Placa electrónica. Esta placa actúa simultáneamente como receptor de radiocontrol, unidad de control, etapa de potencia para los motores de tracción y distribuidor de alimentación para los periféricos de origen. El resultado es un sistema simple y funcional para uso recreativo, pero con escasa modularidad y sin margen para integrar navegación autónoma.

En la instalación original pueden distinguirse, por su función, tres bloques de cableado: alimentación, tracción y auxiliares. La alimentación llega a la placa mediante un par de conductores rojo/negro que constituyen la línea principal de energía. A partir de esa entrada, la propia placa realiza la distribución interna hacia la electrónica de control y la etapa de potencia que conmuta la energía hacia el sistema de tracción.

En lo relativo a la tracción, desde la placa electrónica original sale un par de cables de mayor sección que se dirige hasta la caja de transmisión, donde se encuentra el motor encargado del movimiento. La propia placa se encarga de controlar ese motor que, en función de las órdenes del mando, determina si el vehículo debe avanzar o retroceder y regula la potencia que se le entrega para variar la velocidad.

Este comportamiento se consigue porque la placa incorpora una etapa de potencia integrada que permite cambiar el sentido del motor (avance/retroceso) y ajustar la energía suministrada. La consecuencia de este diseño es que el control del vehículo depende totalmente de esa placa. Al no existir un regulador de motor independiente, no es posible sustituirlo o configurarlo de forma flexible sin modificar o reemplazar la electrónica original.

Por último, se observa un conjunto de cables de menor sección que salen de conectores secundarios de la placa y se encaminan hacia otros elementos del vehículo, como la iluminación. Este cableado corresponde a consumos de baja potencia y confirma que la placa no solo controla la tracción, sino que también distribuye y gobierna funciones auxiliares.

En conjunto, la electrónica original puede considerarse monolítica ya que resuelve el funcionamiento básico con muy pocos componentes y un cableado reducido, pero a cambio deja el sistema prácticamente cerrado. Por ello, si se pretende incorporar nuevas capacidades como un autopiloto, sensores adicionales, telemetría o un control más avanzado, resulta necesario replantear la arquitectura, separando la sección de potencia del sistema de control e implantando una solución más modular y escalable.

3.6.2 Análisis de la electrónica propuesta

La electrónica adaptada se plantea con una filosofía opuesta a la de origen. En lugar de una placa única, se adopta una arquitectura por módulos, donde cada elemento realiza una función concreta y se conecta siguiendo una lógica. El objetivo es doble: por un lado, habilitar un control robusto mediante Pixhawk (ArduRover) y por otro, asegurar que la potencia de tracción no compromete la estabilidad del sistema de control.

A nivel de conjunto, la nueva configuración integra batería LiPo, Pixhawk 2.4.8, receptor FlySky FS-iA6B, módulo GPS, controlador de motores Cytron MDD3A, y un Arduino Nano como interfaz de adaptación de señales.

3.6.2.1 Cadena de alimentación

La alimentación del sistema parte de una batería LiPo, elegida para aumentar la autonomía y disponer de un mayor margen de corriente respecto a la configuración original. A partir de esta batería se plantea una distribución que separa dos necesidades distintas. Por un lado, la potencia destinada a la tracción y, por otro, una alimentación estable para la electrónica de control. Esta separación resulta esencial, ya que el sistema de orugas y la transmisión pueden generar picos de consumo que provoquen caídas de tensión. Si esas variaciones alcanzaran a la electrónica de control, el autopiloto podría reiniciarse o funcionar de forma inestable.

En la rama de potencia, la energía se conduce hacia el controlador de motores Cytron MDD3A mediante conductores dimensionados para corrientes elevadas y conectores adecuados. En paralelo, una derivación de la misma batería alimenta la Pixhawk a través de su entrada específica *POWER*, utilizando el cableado destinado a ese fin. Esta entrada asegura que la Pixhawk reciba una tensión regulada y estable, normalmente de 5 V, necesaria para un funcionamiento seguro y continuo.

Por último, para mantener una instalación limpia y fiable, se emplean elementos de unión y reparto que permiten organizar la distribución de potencia y evitar conexiones improvisadas. Este criterio reduce el riesgo de fallos por contactos deficientes y facilita el mantenimiento y la modificación del sistema en fases posteriores.

3.6.2.2 Pixhawk 2.4.8: conexiones principales y sentido funcional de cada enlace

La Pixhawk actúa como núcleo de control del sistema, concentrando tanto el procesamiento de las entradas como la generación de salidas de mando hacia la tracción. En términos de cableado, las conexiones esenciales se agrupan en alimentación, radio, navegación y salidas de control. Su configuración se puede ver reflejada en la Figura 3-41.



Figura 3-41 Pixhawk 2.4.8 [autoría propia uso de IA]

La alimentación llega a través del puerto *POWER*, que se conecta al sistema de distribución descrito en el apartado anterior. Esta conexión no solo alimenta la Pixhawk, sino que asegura que la referencia eléctrica (*GND*) sea común con el resto de los módulos, condición indispensable para que las señales PWM y comunicaciones funcionen de forma correcta.

La navegación se integra mediante el módulo GPS, conectado al puerto específico GPS de la Pixhawk (Figura 3-41). Este enlace aporta posicionamiento y, cuando el módulo lo incluye, referencia de orientación, permitiendo que ArduRover disponga de datos para modos asistidos o autónomos.

El enlace de radiocontrol se realiza entre el receptor FS-iA6B y la entrada de radio de la Pixhawk. El receptor recibe las órdenes del mando y las entrega a la Pixhawk en forma de canales RC. A partir de esos canales, ArduRover interpreta acelerador, dirección y funciones auxiliares. Este diseño sustituye el esquema original por un sistema abierto y configurable.

Finalmente, la Pixhawk genera salidas de control por sus buses *MAIN OUT/AUX OUT*, que se emplean para mandar órdenes a los actuadores o a la electrónica intermedia (Figura 3-41).

3.6.2.3 Control de tracción

El controlador Cytron MDD3A actúa como la etapa de potencia que alimenta y controla la tracción del vehículo. En cuanto al cableado, por un lado, recibe la energía directamente de la batería y por otro envía esa energía al motor/transmisión mediante sus salidas específicas (Figura 3-42). Con este reparto se consigue que el Cytron asuma los picos de corriente que generan los motores, mientras que la Pixhawk queda aislada de esas variaciones y puede trabajar de forma más estable.

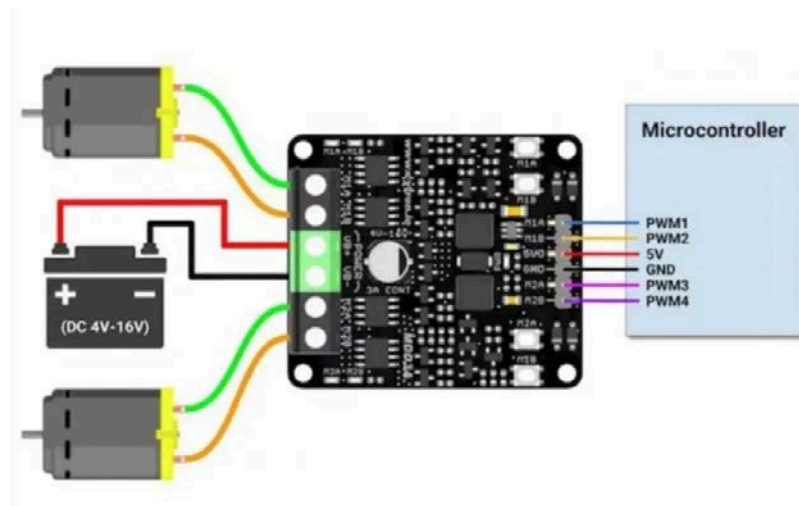


Figura 3-42 Cytron MDD3A [autoría propia uso de IA]

Además de la alimentación de potencia, el Cytron necesita señales de control para decidir la velocidad y el sentido de giro de cada motor. Estas señales entran por su conector de control y se llevan mediante cableado hasta el módulo de adaptación. Así, la tracción no depende de una electrónica cerrada como la original, sino que queda controlada de forma estable y configurable, algo clave en un UGV cuando se busca ajustar la respuesta del vehículo y obtener un movimiento más predecible.

3.6.2.4 Arduino Nano

Para hacer posible la comunicación entre la Pixhawk y el controlador de motores Cytron MDD3A, se incorporó un Arduino Nano como elemento auxiliar dentro del sistema, tal como se muestra en la Figura 3-43. Su función no es simplemente servir de conexión entre ambos componentes, sino ejecutar el código necesario para adaptar la señal que sale de la Pixhawk a la señal que necesita el Cytron para controlar correctamente los dos motores del vehículo.

La Pixhawk genera señales PWM a partir de las órdenes de movimiento que recibe del operador. Sin embargo, esas señales no pueden aplicarse directamente al controlador de motores sin un tratamiento previo. Por este motivo, el Arduino Nano se emplea como un microcontrolador intermedio encargado de leer la señal PWM procedente de la Pixhawk y traducirla a la lógica de control que requiere el Cytron para gobernar tanto la velocidad como el sentido de giro de cada motor.

Para ello, se utilizó como base el código facilitado por el propio fabricante de Cytron para este tipo de integración. Además, durante el proceso de montaje y programación se tomó como referencia el vídeo técnico empleado como guía [40], ya que en él se mostraba el funcionamiento de esta solución y su aplicación práctica.

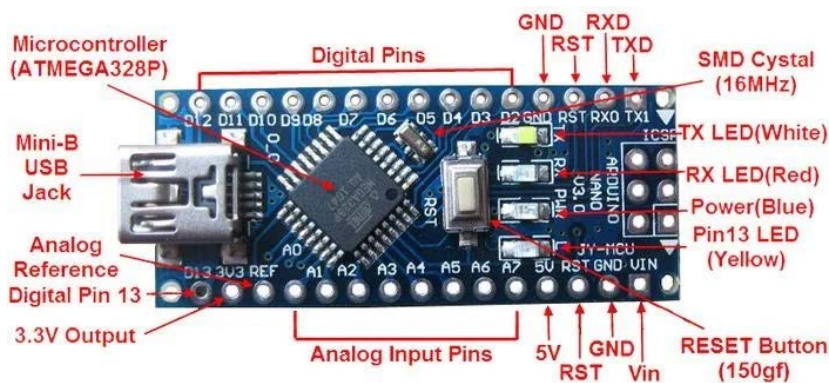


Figura 3-43 Arduino Nano [autoría propia uso de IA]

Gracias a esta configuración, la cadena de control del sistema queda organizada de forma secuencial. La emisora envía las órdenes al receptor, la Pixhawk las interpreta y genera la señal de salida correspondiente, el Arduino Nano adapta esa señal según lo que necesita el Cytron y, finalmente, el controlador actúa sobre los motores del vehículo. Esta solución permite integrar de forma coherente el sistema de autopiloto con la etapa de potencia encargada del movimiento del UGV.

3.6.2.5 Integración del receptor FlySky FS-iA6B

El receptor FS-iA6B se utiliza como enlace entre el mando *FlySky* y la Pixhawk. El funcionamiento se basa en que el mando envía las órdenes de los interruptores en forma de canales, el receptor las recibe y las convierte en señales que la Pixhawk puede leer. A partir de ahí, ArduRover interpreta esas órdenes y actúa sobre el vehículo.

Frente al sistema original del coche donde el receptor estaba integrado dentro de una placa propietaria, en esta configuración el receptor pasa a ser un módulo independiente. Esto facilita la puesta a punto, ya que los canales se pueden calibrar y reasignar desde *Mission Planner* de forma más flexible.

En cuanto al cableado, el receptor se conecta a la Pixhawk mediante un cable de conexión que aporta alimentación y señal, asegurando además que ambos comparten la misma masa (*GND*).

3.6.3 Configuración en Mission Planner

Una vez completada la integración física básica del sistema, la puesta en servicio de la controladora se realizó mediante *Mission Planner*, empleándolo como estación de configuración y verificación. El objetivo de esta fase fue dejar instalada la Pixhawk con el *firmware* ArduRover, calibrar los elementos imprescindibles y configurar entradas y salidas de forma que el vehículo pudiera operarse en condiciones controladas y seguras. Para asegurar trazabilidad, cada paso se realizó siguiendo un orden lógico: conexión, instalación de *firmware*, configuración base del tipo de vehículo, calibraciones, definición de modos, asignación de salidas y verificación final.

3.6.3.1 Conexión inicial al autopiloto

El procedimiento comenzó conectando la Pixhawk 2.4.8 al ordenador mediante cable USB. Esta conexión permite la comunicación directa entre la controladora y *Mission Planner* para cargar *firmware* y modificar parámetros. Con la Pixhawk conectada, se abrió *Mission Planner* y se seleccionó el puerto COM correspondiente en la parte superior de la interfaz. Tras seleccionar el puerto, se estableció la conexión y se verificó que el programa recibía información del sistema y mostraba el estado general en la pantalla principal (Figura 3-44). Esta comprobación inicial es importante, ya que confirma que la comunicación es estable antes de iniciar la instalación del *firmware*.



Figura 3-44 Pantalla principal de Mission Planner con autopiloto conectado

o a la estabilidad del control. En esta etapa se ejecutaron las calibraciones guiadas por *Mission Planner* siguiendo las indicaciones del programa hasta completar el proceso y obtener confirmación de calibración correcta.

La calibración, mostrada en la Figura 3-47, se considera necesaria para asegurar que el sistema queda correctamente inicializado y preparado para operar sin avisos críticos.

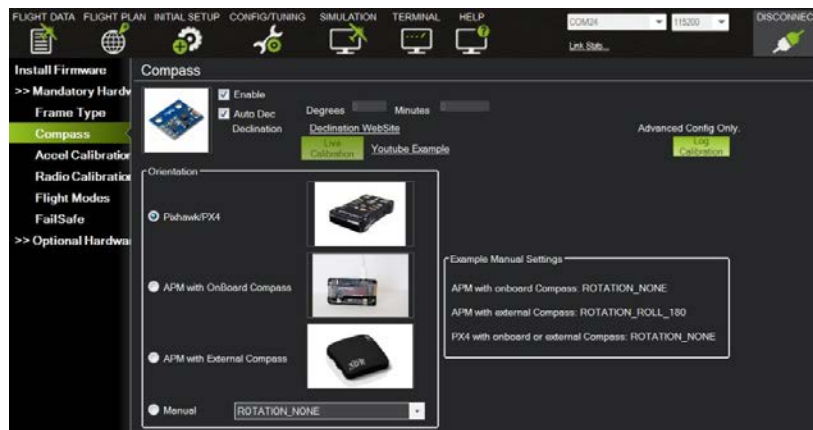


Figura 3-47 Calibración de la pixhawk

3.6.3.5 Calibración de radio

Una vez validada la base del autopiloto, se procedió a calibrar la entrada del radiocontrol. En *Mission Planner* se abrió el apartado *Radio Calibration*, donde se comprueba que los canales del mando son detectados y se registran sus valores mínimo, máximo y centro. Durante este proceso se movieron los sticks y conmutadores para asegurarse de que cada canal recorría todo su rango y quedaba correctamente registrado (Figura 3-48).

Esta fase es esencial porque ArduRover se apoya directamente en estos canales para gobernar el vehículo. Una calibración incompleta puede provocar respuesta limitada, centrados incorrectos o inversión de controles. En caso de observar un sentido de movimiento contrario al esperado, se corrigió invirtiendo el canal correspondiente o ajustando el centrado, de modo que la lógica de dirección y aceleración quedase intuitiva y coherente.

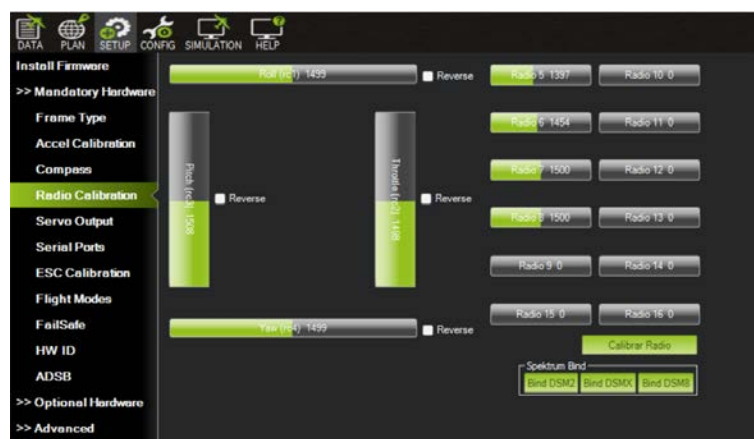


Figura 3-48 Calibración de canales RC

3.6.3.6 Configuración de modos de operación

Con la radio calibrada, se configuraron los modos de operación del rover. *Mission Planner* permite asignar distintos modos a un canal auxiliar controlado desde el mando. En esta fase se seleccionó al menos un modo Manual como referencia para pruebas, y se añadieron modos adicionales cuando

resultaba útil para validación o futuras etapas del proyecto. La configuración realizada puede observarse en la pantalla de *Flight Modes* (Figura 3-49).

El objetivo de esta etapa no es solo disponer de varios modos, sino garantizar que el sistema puede mantenerse en un modo base controlado durante las primeras pruebas y que el cambio de modo es reproducible desde el mando.

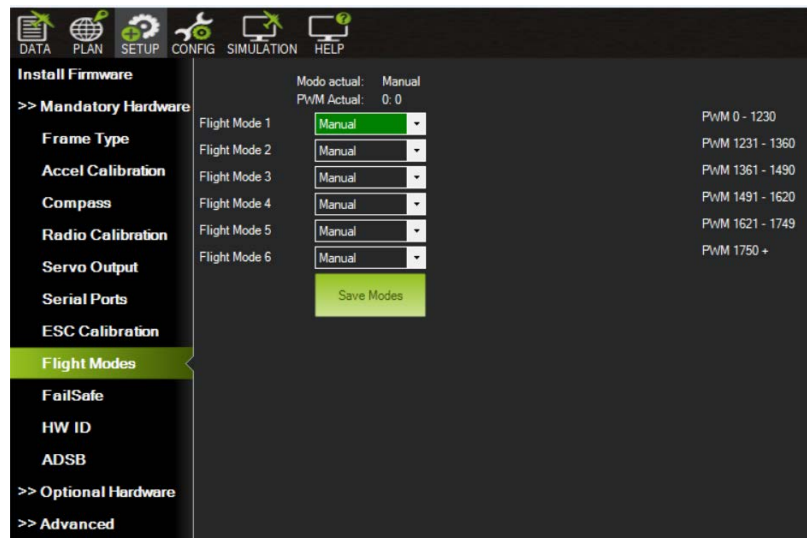


Figura 3-49 Configuración de modos de operación

3.6.3.7 Asignación de las funciones a las salidas

A continuación, se configuraron las salidas PWM del autopiloto desde la sección *Servo Output*. En esta pantalla se asigna a cada salida una función concreta dentro del comportamiento del vehículo. En el caso del UGV, se establecieron las salidas principales para conducción, destacando *GroundSteering* (dirección) y *Throttle* (aceleración), quedando reflejado en la configuración de salidas (Figura 3-50).

Esta fase permite cerrar la cadena de control completa: el mando genera canales, la Pixhawk los interpreta y, en función de esa interpretación, genera salidas que gobiernan la etapa de potencia. Además, *Mission Planner* permite revisar límites de PWM, inversión y centrados, lo que ayuda a afinar el comportamiento del vehículo.



Figura 3-50 Asignación de funciones a salidas

3.6.3.8 Configuración de seguridad

Una vez definidos los elementos de entrada y salida, se configuraron los parámetros de seguridad en el apartado *FailSafe*. El objetivo es definir el comportamiento del vehículo ante pérdida de señal, fallos de enlace o condiciones anómalas, de forma que el sistema adopte un estado seguro como, por ejemplo, detener el vehículo o cortar el mando. La pantalla de configuración de failsafe y los parámetros principales se muestran en la Figura 3-51.

Este punto es especialmente relevante en un entorno de pruebas, ya que reduce el riesgo de que el vehículo continúe moviéndose sin control ante un fallo de radiocontrol o comunicación.



Figura 3-51 Configuración de seguridad del sistema

3.6.3.9 Verificación de funcionamiento

Como comprobación final antes de realizar ensayos dinámicos, se empleó la herramienta *Motor Test* incluida en *Mission Planner*. Esta función permite activar el sistema de forma controlada y verificar que las salidas reaccionan como se espera, confirmando que es coherente. La pantalla de prueba de motores se recoge en la Figura 3-52.

Esta verificación se realizó en condiciones seguras, con el vehículo asegurado, para evitar daños mecánicos en caso de que existiera alguna inversión de canales o asignación incorrecta de salidas.



Figura 3-52 Verificación de salidas mediante Motor Test

3.6.3.10 Revisión y registro de parámetros

Por último, se revisó el conjunto de parámetros mediante el listado completo *Full Parameter List*, con el objetivo de comprobar coherencia general y documentar el estado final de la configuración empleada. Esta vista es útil para registrar la configuración de manera trazable y permite replicar el proceso o volver a un estado conocido en caso de cambios posteriores (Figura 3-53).

Name	Value	Units	Options	Desc
ACRO_TURN_RATE	180	deg/s	0-260	Acro turn rate maximum
AHRS_COMP_BETA	0.1		0.001-0.8	This controls the time constant for the cross-over frequency used to fuse AHRS (amped and heading) and GPS data to estimate ground velocity. Time constant is 0.1 beta. A beta of 0.1 means that the AHRS data is used 10% and GPS data is used 90%.
AHRS_ENF_TYPE	3		0 Disabled 1 Enable EX7 2 Enable EX7 3 Enable EX7	This controls which NavExt Kalman filter version is used for attitude and position estimation.
AHRS_GPS_GAIN	1		0.0-1.0	This controls how much to use the GPS to correct the attitude. This should never be set to zero for a plane as it would result in the plane losing control in turns. For a plane please use a value of 1.0.
AHRS_GPS_MINSAT	6		0-10	Minimum number of satellites to use GPS for velocity based corrections attitude correction. This defaults to 6, which is about the point at which the vehicle numbers from the GPS start to be reliable.
AHRS_GPS_USE	1		0 Disabled 1 Use GPS for DCM position 2 Use GPS for DCM position 3 Use GPS for DCM position	This controls whether to use deadreckoning or GPS based navigation. If set to 0 then the GPS won't be used for navigation, and only dead reckoning will be used. A value of 1 will use GPS for DCM position, and a value of 2 will use GPS for DCM position.
AHRS_OPTIONS	0		0 Disabled 1 Enable EX7 2 Enable EX7 3 Enable EX7	This controls optional AHRS behavior. Setting 'DisableCMG' which is 1 will change the AHRS behavior for heading control to the forward flight to not fall back to DCM when the heading is lost. Setting 'DisableCMG' which is 0 will fall back to DCM when the heading is lost.
AHRS_ORIENTATION	0	0 None 1 Yaw45 2 Yaw90		Overall board orientation relative to the standard orientation for the board. This rotates the IMU and compass readings to allow the board to be oriented in your vehicle as you wish.
AHRS_RP_P	0.2		0.1-0.4	This controls how fast the accelerometers correct the attitude.
AHRS_TRIM_X	-0.0025139	rad	-0.1785 to 0.1785	Compensate for the roll angle difference between the control board and the frame. Positive values make the vehicle roll right.
AHRS_TRIM_Y	0.005820989	rad	-0.1785 to 0.1785	Compensate for the pitch angle difference between the control board and the frame. Positive values make the vehicle pitch up/back.
AHRS_TRIM_Z	0	rad	-0.1785 to 0.1785	Not Used
AHRS_WIND_MAX	0	m/s	0-127	This sets the maximum allowable difference between ground speed and airspeed. A value of zero means to use the airspeed sensor. This allows the plane to correct itself if falling.
AHRS_WIND_P	0.2		0.1-0.4	This controls the weight of the compass or GPS bias on the heading. A higher value means the heading will track the yaw source (GPS or compass) more rapidly.
AIS_TYPE	0	0 None 1 NMEA AISCM message		AIS receiver type
ARMING_ACCTHRESH	0.75	m/s/s	0.25-3.0	Accelerometer error threshold used to determine accelerometer accelerations. Compares the error range to other accelerations to detect a hardware or calibration error. Lower values are more sensitive.
ARMING_CHECK	1		0 Disabled 1 Enable EX7 2 Enable EX7 3 Enable EX7	Checks prior to arming motor. This is a bitmask of checks that will be performed before allowing arming. For most users it is recommended to leave this at the default of 1 (all checks enabled). This parameter is also used to determine if the vehicle is in a safe state to be armed. Do not set this parameter unless the risk of doing so is fully understood.
ARMING_CRASH_ON	0	0 Crash Dump among check 1 Crash Dump among check 2 Crash Dump among check 3 Crash Dump among check		Must have valid 'T' if crash dump data is present on the system, or a ground failure will be needed. Do not set this parameter unless the risk of doing so is fully understood.
ARMING_MAGTHRESH	100	mGauss	0-500	Compass magnetic field strength error threshold vs earth magnetic model. X and Y axes are compared using the threshold. Z axis uses 2x the threshold. 0 to disable check.
ARMING_MID_ITEMS	0			Bitmask of mission items that are required to be planned in order to arm the aircraft.

Figura 3-53 Registro de parámetros

3.6.4 Integración y configuración de servos auxiliares para el control de cámara

Tras finalizar la integración del sistema principal de control del vehículo, se valoró la incorporación de dos servos auxiliares destinados a gestionar la orientación de la cámara. Con esta ampliación se buscaba disponer de un subsistema independiente que permitiera dirigir la cámara en los ejes necesarios utilizando el propio mando de radiocontrol. De este modo, la plataforma quedaría preparada para una futura integración total del sistema de visión.

3.6.4.1 Alimentación mediante BEC

Durante las pruebas iniciales se detectó que, a pesar de estar correctamente definidas las salidas en *Mission Planner*, los servos no reaccionaban ante los movimientos de los canales asignados. El problema no se debía a la configuración, sino a una limitación en la alimentación eléctrica. Aunque la Pixhawk genera la señal PWM necesaria para el control de un servo, no proporciona la potencia suficiente para su funcionamiento. En este caso, los servos requerían una fuente estable de 5 V que el rail de salidas no entregaba de manera efectiva. Como resultado, las órdenes llegaban al actuador, pero este no disponía de energía para ejecutarlas. Para solventar esta limitación se añadió un BEC (*Battery Eliminator Circuit*), mostrado en la Figura 3-54, encargado de transformar la tensión de la batería principal en una salida regulada. Este dispositivo resulta útil en sistemas donde se busca aislar el consumo de los servos respecto a la electrónica de control, evitando caídas de tensión o comportamientos inestables cuando varios componentes operan simultáneamente.

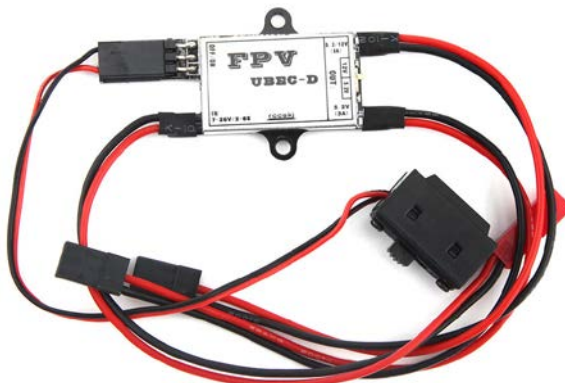


Figura 3-54 BEC

Una vez seleccionado el BEC adecuado, se procedió a su integración dentro del esquema eléctrico del vehículo. Su función consistió en alimentar el rail de servos correspondiente a las salidas del autopiloto, garantizando una tensión constante y segura para el funcionamiento de los actuadores. La energía fluye de manera que la batería principal suministra la tensión al sistema, el BEC la regula y la entrega al circuito de salidas donde se conectan los servos. De este modo, la Pixhawk continúa emitiendo la señal de control, pero la potencia necesaria para activar los servos proviene de una fuente externa estabilizada.

Este enfoque es fundamental porque marca una separación clara entre las funciones del sistema. La Pixhawk se encarga de generar y gestionar las señales de control, mientras que el BEC suministra la energía necesaria para que los servos funcionen correctamente. Gracias a esta distribución, el uso de los servos no interfiere en la estabilidad ni en el rendimiento del sistema principal.

3.6.4.2 Conexión física de los servos

Una vez resuelta la parte de alimentación, se procedió a conectar físicamente los servos a la Pixhawk. Para ello se emplearon las salidas auxiliares *AUX OUT 1* y *AUX OUT 2*, que en la lógica interna del autopiloto se corresponden con *SERVO9* y *SERVO10*.

Cada servo se instaló utilizando su conector de tres cables (señal, positivo y GND), cuidando la polaridad y la orientación en el conjunto de pines. En esta disposición, la señal de control generada por la Pixhawk viaja por la línea asociada al canal de salida, mientras que la alimentación y la referencia de tierra quedan garantizadas gracias al BEC integrado en etapas anteriores.

Los servos se conectaron a las salidas auxiliares de la Pixhawk en lugar de a las salidas principales. Esto se hizo porque las salidas principales se utilizan para controlar los elementos más importantes del vehículo, es decir, aquellos que intervienen directamente en su movimiento y tracción. En cambio, las salidas auxiliares se emplean para actuadores secundarios. En este caso, se utilizan para mover los servos que permitirán orientar la cámara. De esta manera se mantiene una organización clara del sistema, por un lado, los elementos encargados del desplazamiento del vehículo, y por otro, los dispositivos auxiliares que realizan funciones adicionales.

3.6.4.3 Asignación de canales en Mission Planner

Una vez realizada la conexión física de los servos, el siguiente paso consistió en configurar en *Mission Planner* qué canales del mando iban a controlar cada uno de ellos. Para ello se utilizaron los canales auxiliares *RCIN5* y *RCIN6*, ya que en la emisora estos canales estaban asociados a los controles que se querían emplear para mover la cámara.

La configuración se llevó a cabo desde la lista de parámetros del autopiloto como se puede apreciar en Figura 3-55. En este apartado se definieron los siguientes valores:

`SERVO9_FUNCTION = RCIN5`

`SERVO10_FUNCTION = RCIN6`



Figura 3-55 Configuración de los canales para los servos

Con esta configuración, la señal que recibe la Pixhawk a través del canal *RCIN5* se envía directamente a la salida *SERVO9*, que corresponde físicamente a *AUX OUT 1*. Del mismo modo, la señal del canal *RCIN6* se dirige a la salida *SERVO10*, correspondiente a *AUX OUT 2*.

Una vez configurados los parámetros, se comprobó la asignación en el apartado *Servo Output* de *Mission Planner*. En esta pantalla se pudo verificar que las salidas #9 y #10 estaban ya asociadas a los canales definidos. Esta comprobación fue importante para asegurarse de que la señal seguía el recorrido correcto desde la emisora hasta las salidas del autopiloto.

En la práctica, esto significa que cuando el operador mueve los controles del mando asociados a *RCIN5* o *RCIN6*, la Pixhawk recibe esa información y genera una señal PWM en las salidas correspondientes. Esa señal es la que utilizan los servos para realizar el movimiento.

3.6.4.4 Verificación del movimiento de los servos

Una vez configuradas las salidas y asegurada la alimentación mediante el BEC, se realizaron varias pruebas para comprobar que el sistema funcionaba correctamente. Durante estas pruebas se observó que el movimiento de los canales *RCIN5* y *RCIN6* en la emisora provocaba el desplazamiento de los servos conectados a *AUX OUT 1* y *AUX OUT 2*.

Este resultado permitió confirmar que la configuración realizada en *Mission Planner* era correcta y que la señal de control llegaba sin problemas a los servos. Además, ayudó a identificar que el problema inicial no estaba relacionado con la configuración del software, sino con la falta de alimentación en el rail de salidas. Una vez incorporado el BEC, el sistema comenzó a funcionar con normalidad.

Esta comprobación tiene importancia dentro del desarrollo del proyecto por dos motivos. Por un lado, demuestra que la arquitectura electrónica diseñada permite controlar no solo la tracción del vehículo, sino también actuadores auxiliares de forma independiente, y por otro, deja preparada la base necesaria para integrar el sistema de visión, ya que los servos podrán utilizarse para orientar la cámara desde el mando.

3.6.4.5 Armado del UGV desde la emisora

Con el propósito de aumentar la autonomía operativa del vehículo y reducir la dependencia del ordenador durante su puesta en servicio, se abordó la configuración del armado y desarmado del UGV directamente desde la emisora. Hasta ese momento, dicha acción se realizaba a través de *Mission Planner*, lo que obligaba a mantener una conexión por cable USB entre la controladora Pixhawk y el

ordenador para poder preparar el sistema antes de su uso. Aunque este procedimiento resultaba válido durante las fases iniciales de configuración y prueba, suponía una limitación práctica de cara a un empleo más ágil y realista del vehículo. Por ello, se planteó como mejora funcional permitir que el UGV pudiese ser armado y desarmado desde el propio mando, sin necesidad de recurrir al ordenador para esta acción concreta. ArduPilot contempla esta posibilidad mediante la asignación de funciones auxiliares a canales RC específicos, de modo que una entrada procedente de la emisora puede asociarse a la orden de armado y desarmado del sistema.

La emisora empleada fue una FlySky FS-i6X. En la configuración previa del sistema, los canales auxiliares *CH5* y *CH6* ya se encontraban ocupados, puesto que estaban asignados a los mandos *VRA* y *VRB*, utilizados para gobernar los dos servos encargados del movimiento de la cámara. Esto condicionó directamente la nueva configuración, ya que dichos canales no podían reutilizarse para el armado sin interferir con el control de la cámara. Fue necesario, por tanto, habilitar un canal adicional independiente, reservado exclusivamente para la nueva función. En este punto, el comportamiento propio de la FS-i6X resultó determinante, ya que este transmisor puede trabajar entre 6 y 10 canales, pero su configuración por defecto es de 6 canales activos. Mientras el equipo permaneciese en esa configuración básica, únicamente podían asignarse los canales auxiliares disponibles dentro de ese rango, lo que impedía disponer de un canal adicional libre para el armado.

Para resolver esta limitación, el primer paso consistió en ampliar el número de canales activos en la emisora. Esta operación se realizó desde el menú *Aux Switches* del transmisor. Según la documentación del FS-i6X, este menú no solo permite activar o desactivar interruptores y mandos auxiliares, sino también modificar la cantidad de canales activos que el sistema utilizará. El procedimiento seguido consistió en acceder a dicho menú, recorrer los distintos elementos configurables mediante la tecla *OK* hasta llegar al parámetro *Ch*, y, una vez seleccionado, incrementar el número de canales activos desde el valor por defecto hasta la nueva configuración necesaria. En este caso, el cambio permitió pasar de un sistema limitado a seis canales a una configuración ampliada, haciendo posible la utilización de canales auxiliares adicionales como el *CH7*. Esta ampliación fue un paso imprescindible, ya que sin ella el mando solo mostraba disponibles los canales 5 y 6 en la pantalla de asignación auxiliar.

Una vez ampliado el número de canales, fue necesario activar el interruptor *SWA* dentro de la propia emisora. Este paso también se realizó desde el menú *Aux Switches*. El manual del FS-i6X indica que este menú permite recorrer los distintos interruptores y mandos auxiliares del transmisor y activar o desactivar cada uno de ellos de manera individual. En consecuencia, se seleccionó el interruptor *SWA* y se cambió su estado a *ON*, dejándolo habilitado para su uso posterior dentro de la asignación de canales. Esta operación era necesaria porque, si el interruptor no se encontraba previamente activado, no aparecía como opción disponible en los menús de asignación. En términos prácticos, esta fase permitió convertir un interruptor físico del mando, inicialmente inactivo para esta aplicación, en una entrada RC utilizable por el autopiloto.

Tras la activación de *SWA*, se procedió a asignarlo a un canal auxiliar concreto, empleando para ello el menú *Aux Channels* de la emisora. El procedimiento consiste en seleccionar con la tecla *OK* el canal que se desea modificar y, posteriormente, utilizar las teclas *UP/DOWN* para elegir la fuente asociada a dicho canal. En este caso, se seleccionó el canal 7 y se asignó como fuente el interruptor *SWA*, manteniendo así intactos los canales 5 y 6 previamente dedicados al movimiento de la cámara. Esta decisión permitió separar claramente ambas funciones. Por un lado, el control de los servos de la cámara y por otro, la futura orden de armado y desarmado del vehículo. Una vez realizada la asignación, la configuración quedó guardada en el transmisor mediante la pulsación prolongada de la tecla *CANCEL*.

Completada la configuración en la emisora, el siguiente paso consistió en verificar que la Pixhawk recibía correctamente la nueva entrada RC. Para ello se utilizó la herramienta *Radio Calibration* de *Mission Planner*. Esta pantalla permite visualizar en tiempo real el comportamiento de todos los canales RC recibidos por el autopiloto y constituye el medio habitual para comprobar que cada mando físico de la emisora se corresponde con el canal esperado. La documentación oficial de *Mission Planner* indica

que la calibración de radio se basa en capturar los valores mínimos, máximos y centrales de cada canal, con el fin de que ArduPilot pueda interpretar adecuadamente las órdenes del transmisor. En este contexto, más allá de la calibración completa, dicha pantalla resultó especialmente útil como herramienta de comprobación, ya que permitió observar de forma directa si el interruptor recién configurado estaba llegando realmente a la controladora.

La comprobación se realizó accionando el interruptor SWA mientras se observaban las barras de canales en la ventana de *Radio Calibration*, tal y como se muestra en la Figura 3-56. El resultado esperado era que uno de los canales libres cambiase claramente entre dos posiciones definidas, correspondientes al estado bajo y alto del interruptor. Así, al mover SWA, la barra correspondiente al canal 7 respondía de manera inmediata, confirmando que la modificación efectuada en la emisora había sido correctamente transmitida al receptor y, a su vez, reconocida por la Pixhawk. Esta validación tuvo una importancia esencial dentro del proceso, ya que permitió asegurar que la nueva orden de entrada estaba disponible en el sistema antes de asignarle una función dentro de ArduPilot.

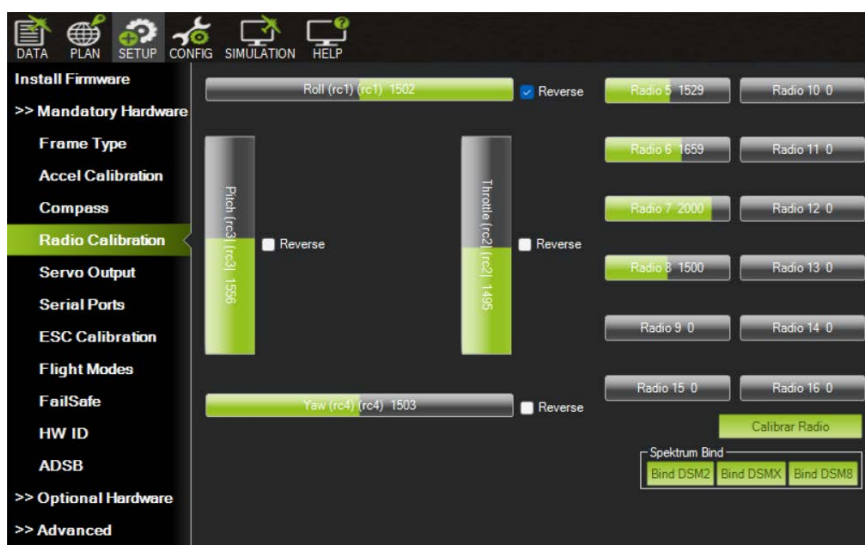


Figura 3-56 Verificación del canal 7 en la pantalla Radio Calibration

Confirmada la presencia del canal 7 en *Mission Planner*, se pasó a la fase de configuración funcional dentro de ArduPilot. Esta parte se llevó a cabo en la pantalla *Full Parameter List* de *Mission Planner*, que muestra todos los parámetros del vehículo y permite modificarlos y guardar los cambios en el autopiloto, como se muestra en la Figura 3-57. Dentro de esta lista se buscó el parámetro *RC7_OPTION*, que es el parámetro asociado al canal 7. Una vez localizado, se introdujo en él el valor 153. De acuerdo con la documentación de ArduPilot para Rover, este valor corresponde a la función *ARM/DISARM*, es decir, permite que cuando el interruptor asociado al canal pase a estado alto el vehículo intente armarse y que, cuando vuelva al estado bajo, el sistema se desarme. Tras introducir este valor, los cambios fueron almacenados en la controladora mediante el botón *Write Params*, cuya función es precisamente escribir en el autopiloto los parámetros modificados en esa pantalla.



Figura 3-57 Configuración del parámetro RC7_OPTION = 153

La validación final del procedimiento se planteó en condiciones controladas, con el vehículo inmovilizado o con las ruedas sin apoyo directo sobre el suelo, con el fin de evitar cualquier movimiento inesperado durante la prueba. Una vez encendidos la emisora y el sistema, y seleccionado un modo manual compatible, se accionó el interruptor SWA, mostrado en la Figura 3-58, para comprobar si el estado del vehículo pasaba de *DISARMED* a *ARMED*.



Figura 3-58 Armado y desarmado desde el emisor

En conjunto, esta modificación supuso una mejora significativa en la operatividad del UGV. La solución implantada permitió mantener intacta la configuración ya existente para el control de la cámara y, al mismo tiempo, incorporar una nueva capacidad de armado desde la emisora, sin necesidad de recurrir al cable USB ni a *Mission Planner* como medio imprescindible para esa acción concreta.

3.7 Integración y configuración de la Raspberry Pi 4B para el sistema FPV

Con el propósito de dotar al UGV de una capacidad básica de visualización remota y reducir la dependencia de un monitor conectado físicamente al vehículo, se contempló la idea de integrar una Raspberry Pi 4B como elemento de soporte para el sistema FPV. La finalidad de esta incorporación era emplear una cámara USB conectada a la propia placa para capturar la imagen y retransmitirla a través de red inalámbrica hacia un dispositivo externo, concretamente un teléfono móvil. De este modo, el operador puede disponer de una referencia visual embarcada sin necesidad de recurrir en cada uso a un monitor conectado por cable ni a un ordenador como elemento imprescindible de puesta en servicio.

La implantación de esta solución no se limitó a conectar una cámara a la Raspberry Pi, sino que implicó un proceso completo de preparación, ajuste y comprobación del sistema. Para ello ha sido necesario instalar y dejar preparado el sistema operativo de la placa, configurar el acceso al entorno de trabajo, verificar la conectividad de red, comprobar que la cámara era reconocida correctamente, poner en marcha la retransmisión de vídeo mediante el *software* VLC y ajustar sus parámetros de funcionamiento para reducir la latencia observada. Finalmente, también se ha automatizado el arranque del sistema para que pudiera iniciar su funcionamiento de forma autónoma al alimentar la Raspberry y se ha establecido una dirección IP fija, con el objetivo de garantizar un acceso estable al vídeo desde la misma dirección en cada puesta en marcha.

3.7.1 Preparación del sistema operativo de la Raspberry Pi 4B

Como punto de partida, fue necesario preparar una tarjeta microSD con el sistema operativo destinado a la Raspberry Pi 4B. Para ello se empleó la herramienta de grabación correspondiente, mediante la cual se seleccionó la imagen del sistema compatible con la placa y se escribió sobre la memoria microSD que posteriormente se instalaría en la Raspberry. Esta fase inicial, representada en la Figura 3-59, constituyó el paso previo para disponer de una base funcional sobre la que poder realizar el resto de las configuraciones relacionadas con el sistema FPV.

Esta fase fue importante porque permitió dejar la placa en condiciones de trabajar desde cero con un entorno ya preparado para su posterior configuración. En este punto, la Raspberry Pi no se planteó como

un ordenador de uso general, sino como un elemento integrado en el vehículo, orientado a arrancar correctamente, conectarse a la red y ejecutar las funciones necesarias para la retransmisión de vídeo.



Figura 3-59 Instalación de la imagen en la SD

3.7.2 Configuración inicial y acceso al sistema

Una vez preparada la microSD e instalada en la Raspberry Pi 4B, se llevó a cabo el primer arranque del sistema con apoyo de un monitor externo y de los periféricos necesarios para completar la configuración inicial. En esta fase se comprobó que la placa arrancaba con normalidad y se accedió al terminal para comenzar con la puesta a punto del sistema tal como se muestra en la Figura 3-60.

A partir de ese punto se realizaron las tareas básicas necesarias para dejar la Raspberry lista para seguir trabajando con ella. Se verificó el acceso al terminal, se actualizó el sistema y se instalaron los paquetes que iban a hacer falta más adelante para trabajar con la cámara y con la retransmisión de vídeo. Además, se comprobó que todo respondía correctamente y que la placa podía utilizarse con normalidad como base sobre la que montar la capacidad FPV.

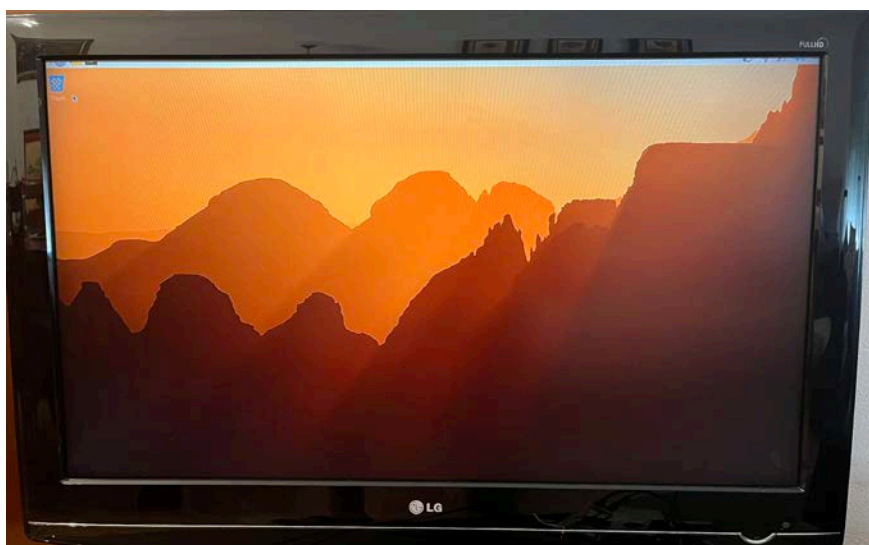


Figura 3-60 Interfaz

3.7.3 Conexión a red y acceso remoto

El paso siguiente fue conectar la Raspberry a una red inalámbrica que permitiese tanto trabajar con ella de forma remota como recibir después el vídeo desde un dispositivo externo. Para ello, se conectó la placa a la misma red utilizada durante las pruebas, de manera que tanto la Raspberry como el teléfono móvil quedasen dentro del mismo entorno de comunicaciones. Esto era necesario, ya que el acceso al flujo de vídeo generado con VLC iba a realizarse más adelante a través de la dirección IP asignada a la propia placa.

Una vez establecida la conexión, se comprobó la dirección IP obtenida por la Raspberry y se verificó que podía accederse al sistema de forma remota. En este momento se pudo empezar a trabajar con la placa sin depender continuamente de un monitor conectado. A partir de ahí, la Raspberry dejó de utilizarse como un equipo conectado a pantalla y pasó a integrarse en la lógica del vehículo, pudiendo gestionarse desde otro terminal cuando fuese necesario. La Figura 3-61 muestra la comprobación de la dirección IP y la conexión Wifi.

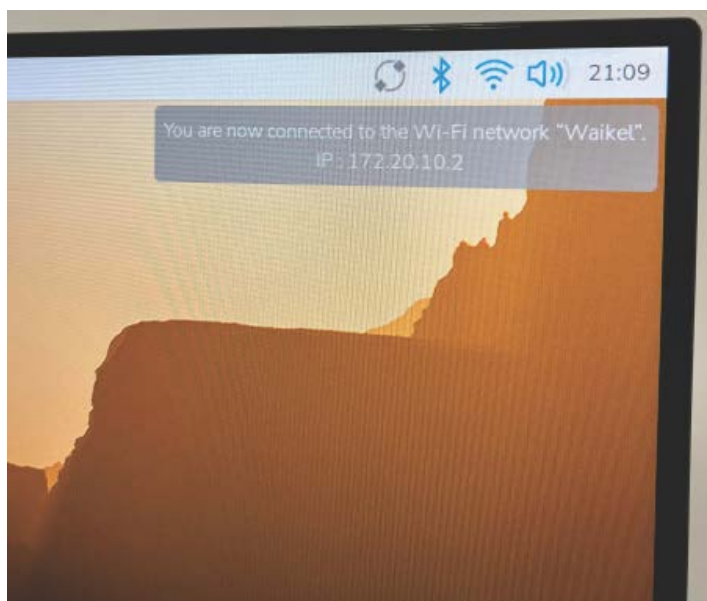


Figura 3-61 Conectividad Wifi y dirección IP

3.7.4 Conexión y reconocimiento de la cámara USB

Una vez que el sistema estaba preparado y la conexión de red comprobada, se conectó la cámara USB que iba a utilizarse como sensor de imagen del sistema FPV. En esta fase, lo primero era asegurarse de que el sistema operativo la reconocía correctamente y de que quedaba disponible como dispositivo de vídeo accesible desde terminal. Para ello, tal y como muestra la Figura 3-62, se revisaron los nodos de vídeo detectados por el sistema y también los formatos y resoluciones que la propia cámara era capaz de soportar.

Esta comprobación tuvo bastante importancia porque permitió descartar posibles fallos de detección o problemas de compatibilidad entre la cámara y la Raspberry Pi. Además, se observó que la cámara generaba más de un nodo de vídeo, por lo que fue necesario identificar cuál de ellos correspondía realmente al flujo de imagen que interesaba utilizar. Del mismo modo, al revisar los formatos soportados se comprobó que la cámara trabajaba, entre otros, con MJPG y YUYV, además de admitir distintas resoluciones y frecuencias de imagen. Toda esta información fue útil ya que permitió escoger una configuración más adecuada para mejorar la fluidez del sistema y reducir, en la medida de lo posible, la carga de proceso y la latencia.

```
asberrypi:~ $ ls /dev/video*
'video0 /dev/video12 /dev/video16 /dev/video21
'video1 /dev/video13 /dev/video18 /dev/video22
'video10 /dev/video14 /dev/video19 /dev/video23
'video11 /dev/video15 /dev/video20 /dev/video31
asberrypi:~ $ v4l2-ctl --list-devices
i35-codec-decode (platform:bcm2835-codec):
/dev/video10
/dev/video11
/dev/video12
/dev/video18
/dev/video31

i35-isp (platform:bcm2835-isp):
/dev/video13
/dev/video14
/dev/video15
/dev/video16
/dev/video20
/dev/video21
/dev/video22
/dev/video23
/dev/media0
/dev/media1

hevc-dec (platform:rpi-hevc-dec):
/dev/video19
/dev/media2

.:0 Camera: USB 2.0 Camera (usb-0000:01:00.0-1.3):
/dev/video0
/dev/video1
/dev/media3

i35-codec (vchiq:bcm2835-codec):
/dev/media4
asberrypi:~ $
```

```
asberrypi:~ $ v4l2-ctl --list-formats-ext -d /dev/video00
.: VIDIIOC_ENUM_FMT
Type: Video Capture

[0]: 'YUYV' (YUYV 4:2:2)
Size: Discrete 640x480
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 352x288
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 320x240
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 176x144
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 160x120
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 1280x960
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
[1]: 'HJPEG' (Motion-JPEG, compressed)
Size: Discrete 640x480
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 352x288
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 320x240
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 176x144
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 160x120
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
Size: Discrete 1280x960
Interval: Discrete 0.033s (30.000 fps)
asberrypi:~ $
```

Figura 3-62 Detección de la cámara USB y comprobación de los nodos de vídeo

3.7.5 Configuración de la retransmisión de vídeo mediante VLC

Una vez comprobado que la cámara estaba disponible y era reconocida correctamente por el sistema, se pasó a configurar la retransmisión del vídeo. Para ello se utilizó VLC en modo de línea de comandos, mediante la utilidad 'cvlc', con el fin de capturar la imagen procedente de la cámara y enviarla a través de la red. La solución elegida consistió en generar un flujo HTTP al que pudiera accederse desde un teléfono móvil conectado a la misma red, de forma que la visualización se realizase directamente desde la aplicación VLC del propio dispositivo.

El funcionamiento del sistema quedó planteado de tal manera que la cámara USB capturaba la imagen, la Raspberry Pi se encargaba de procesarla y retransmitirla por red, y el teléfono móvil actuaba como receptor del vídeo. Esta configuración permitió separar físicamente la captura y la visualización de la imagen, dejando de depender de un monitor conectado directamente a la Raspberry durante el uso normal del sistema.

En esta fase se realizaron varias pruebas iniciales para comprobar que la cámara podía abrirse correctamente desde VLC y que la imagen llegaba al dispositivo móvil, tal como se aprecia en la Figura 3-63. La validación de este punto supuso la primera comprobación práctica de que el vehículo podía ofrecer una referencia visual remota sin necesidad de una pantalla conectada físicamente al sistema.

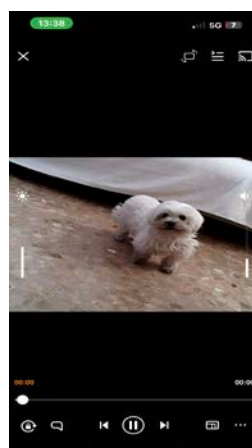


Figura 3-63 Visualización de VLC en dispositivo móvil

3.7.6 Ajuste del sistema y reducción de latencia

Aunque la retransmisión de vídeo empezó a funcionar, el retardo con el que llegaba la imagen al dispositivo receptor era demasiado alto para el uso que se buscaba. La latencia inicial era excesiva y hacía que el sistema resultase poco útil incluso como referencia visual, por lo que fue necesario revisar distintos parámetros de la transmisión para intentar reducir ese retraso.

Los ajustes realizados se centraron en tres aspectos. La resolución de trabajo, la frecuencia de imagen y el formato de captura empleado. Tras varias pruebas, se comprobó que el formato MJPG ofrecía un comportamiento más favorable que otras alternativas, ya que aligeraba la carga de procesamiento asociada a la adquisición y al envío del flujo. A esto se añadió la reducción de la resolución y de la tasa de imágenes por segundo, lo que permitió mejorar la respuesta del sistema frente a configuraciones más exigentes.

Además de estos cambios, también se modificó el modo de envío del vídeo para simplificar el tratamiento del flujo y reducir parte del retardo acumulado. Como resultado, la latencia disminuyó de forma apreciable respecto a las primeras pruebas y terminó situándose en torno a 2 segundos. Aunque esta respuesta seguía siendo insuficiente para plantear una conducción de precisión basada exclusivamente en visión en primera persona, sí permitió disponer de una capacidad de observación remota mucho más estable y útil como apoyo visual. La Figura 3-64 muestra el ajuste de parámetros realizado.

```
cvlc v4l2:///dev/video0 \
:v4l2-chroma=MJPG \
:v4l2-width=320 \
:v4l2-height=240 \
:v4l2-fps=10 \
--sout '#standard{access=http,mux=mpjpeg,dst=:8080/}' \
--no-sout-all \
--sout-keep
```

Figura 3-64 Ajuste de los parámetros de retransmisión para la reducción de latencia

3.7.7 Automatización del arranque del sistema FPV

Con la retransmisión ya operativa y ajustada, el siguiente objetivo fue eliminar la necesidad de iniciar manualmente el sistema desde terminal cada vez que se alimentaba la Raspberry Pi. Hasta ese momento, aunque el enlace de vídeo ya podía establecerse con éxito, seguía siendo necesario ejecutar varios comandos desde la terminal para poner el sistema en marcha, lo que introducía una dependencia innecesaria del usuario y se alejaba del objetivo de disponer de un sistema autónomo.

Para resolver esta situación, se creó un *script* específico encargado de lanzar la retransmisión de vídeo con los parámetros finales seleccionados, mostrado en la Figura 3-65. Este script, además de simplificar el arranque del flujo, permitió incorporar una pequeña lógica de comprobación para verificar la disponibilidad de la cámara antes de iniciar la emisión. Posteriormente, dicho *script* se integró en el arranque del sistema mediante un servicio del sistema operativo, de forma que la Raspberry Pi ejecutase automáticamente la retransmisión tras completar su secuencia de inicio.

Esta modificación supuso una mejora relevante desde el punto de vista de la integración en el UGV. Gracias a ella, el sistema dejó de depender del lanzamiento manual de comandos desde un ordenador o desde un terminal conectado a la Raspberry. En consecuencia, era suficiente con alimentar la placa, mantener la cámara conectada y esperar a que el sistema completase su arranque para disponer nuevamente del flujo de vídeo accesible desde el dispositivo móvil. Con ello, el sistema FPV quedó más integrado dentro del vehículo y más próximo a un uso real sin intervención constante del operador.

```
ugv@raspberrypi:~$ cat ~/fpv.sh
#!/bin/bash
sleep 2

if [ -e /dev/video0 ]; then
    DEV=/dev/video0
elif [ -e /dev/video1 ]; then
    DEV=/dev/video1
else
    echo "No se ha encontrado la cámara USB"
    exit 1
fi

exec cvlc v4l2://$DEV :v4l2-chroma=YUV :v4l2-width=320 :v4l2-height=240 :v4l2-fps=10 --sout '#standard{access=http,mux=mpjpeg,dst=:8080}' --no-sout-all --sout-keep

ugv@raspberrypi:~$ sudo cat /etc/systemd/system/fpv.service
[Unit]
Description=FPV Stream UGV
After=network-online.target
Wants=network-online.target

[Service]
User=ugv
WorkingDirectory=/home/ugv
ExecStart=/home/ugv/fpv.sh
Restart=always
RestartSec=3

[Install]
WantedBy=multi-user.target
ugv@raspberrypi:~$
```

Figura 3-65 Script y servicio de arranque automático del sistema FPV

3.7.8 Asignación de dirección IP fija

Una vez resuelto el arranque automático, quedaba fijar una dirección IP que no cambiase entre arranques. Mientras la Raspberry siguiese dependiendo de una asignación dinámica, existía la posibilidad de que la IP variase cada vez que se conectaba a la red, lo que obligaba a comprobarla antes de poder acceder al vídeo desde el móvil. Esto resultaba poco práctico y se alejaba de la idea de contar con un sistema sencillo y rápido de poner en servicio.

Para evitar ese problema, se configuró manualmente una dirección IP fija dentro de la red utilizada durante las pruebas, junto con su máscara, la puerta de enlace y el servidor DNS correspondientes. En la Figura 3-66 se muestra el archivo de configuración modificado. Gracias a este cambio, la Raspberry mantuvo siempre la misma dirección dentro de esa red, lo que permitió acceder al flujo de vídeo desde VLC utilizando siempre la misma ruta, sin necesidad de hacer comprobaciones adicionales en cada encendido.

Con esta última modificación quedó completado de forma coherente el proceso de integración del sistema FPV sobre la Raspberry Pi 4B. A partir de ese momento, el uso del conjunto quedó reducido a conectar la cámara USB, alimentar la Raspberry y abrir desde el teléfono móvil la dirección ya conocida. Esta mejora permitió que el sistema dejase de depender de monitor, terminal y configuraciones manuales para pasar a ofrecer un funcionamiento mucho más autónomo una vez alimentado.

```
ugv@raspberrypi:~$ sudo tail -n 20 /etc/dhcpd.conf

# Request a hostname from the network
option host_name

# Most distributions have NTP support.
option ntp_servers

# A ServerID is required by RFC2131.
require dhcp_server_identifier

# Generate SLAAC address using the Hardware Address of the interface
#slaac hwaddr
# OR generate Stable Private IPv6 Addresses based from the DUID
slaac private

interface wlan0
static ip_address=172.20.10.2/28
static routers=172.20.10.1
static domain_name_servers=172.20.10.1 8.8.8.8
ugv@raspberrypi:~$
```

Figura 3-66 Configuración de IP fija

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos tras la transformación del vehículo de partida en un prototipo UGV. Para ello, se muestra cómo ha quedado finalmente el sistema, se comparan sus capacidades con las del vehículo original y se analizan distintas pruebas realizadas para comprobar su funcionamiento. Por último, se valora de forma práctica el alcance de las mejoras introducidas a partir de un escenario de empleo simulado.

4.2 Resultado del modelado CAD

4.2.1 Planimetría

En este apartado se recoge la documentación gráfica obtenida a partir del modelo CAD final desarrollado en *Autodesk Inventor*. La planimetría que se muestra en el Anexo IV: planimetría, se plantea como un complemento al diseño 3D que permite trasladar el resultado del modelado a un formato técnico y ordenado, facilitando la comprensión del UGV a nivel de conjunto y de subconjuntos.

Para ello se incluyen láminas con vistas normalizadas, secciones y detalles de las zonas más relevantes del vehículo. De este modo, la planimetría actúa como soporte para justificar decisiones de diseño, verificar coherencia dimensional y documentar con claridad cómo se integran entre sí los elementos mecánicos y las plataformas de electrónica dentro del UGV.

Las láminas se organizan siguiendo una lógica de lo general a lo particular. Primero se presenta el conjunto completo y, a continuación, los subconjuntos principales y las piezas que resultan críticas por su función o por su influencia en el ensamblaje final.

En la Tabla 4-1 se recogen los planos destinados a presentar el UGV como un conjunto único. Se incluyen vistas generales para fijar proporciones y envolvente, y se añaden secciones para visualizar la organización interna del chasis y la relación espacial entre tracción, transmisión y plataformas de integración. La vista explosionada permite identificar rápidamente la estructura modular del modelo y sirve como punto de partida para los subconjuntos definidos en las tablas siguientes.

Designación	Numeración
Vista isométrica del ensamblaje completo (a color)	1
Vista isométrica del ensamblaje completo (a línea)	2
Vistas principales: alzado, planta y perfil (a color)	3
Vistas principales: alzado, planta y perfil (línea)	4
Sección del ensamblaje completo (a color)	5
Sección del ensamblaje completo (línea)	6
Explosionado general	7

Tabla 4-1 Planos del ensamblaje del UGV

Los planos de la Tabla 4-2 recogen el sistema de tracción por orugas. La vista explosionada permite interpretar el orden de montaje y la relación entre ruedas, amortiguación y correa. Los despieces individuales documentan la geometría funcional de cada elemento y facilitan la lectura del conjunto, especialmente en zonas donde pequeñas variaciones dimensionales condicionan la trayectoria de la oruga y la ausencia de interferencias.

Designación	Numeración
Plano de la pieza patrón de la correa	8
Plano de la rueda conducida superior	9
Plano de la rueda conducida inferior	10
Plano de la rueda conductora	11
Plano de la rueda tensora	12
Despiece conjunto amortiguación + rueda inferior	13

Tabla 4-2 Planos del conjunto de tracción por orugas

En la siguiente Tabla 4-3 se agrupan los planos que explican la disposición interior del UGV. La vista explosionada permite ver cómo el chasis actúa como pieza base y cómo se integran las plataformas en dos alturas. Los despieces documentan la geometría de las superficies de apoyo y los puntos de fijación.

Designación	Numeración
Explosionado del conjunto interior (chasis + soportes + plataformas)	14
Despiece del chasis inferior	15
Despiece de la plataforma de 2ª planta	16

Tabla 4-3 Planos del conjunto interior e integración

4.3 Comparación entre el vehículo de serie y el prototipo modificado

La comparación entre la configuración original del vehículo y la versión obtenida tras el desarrollo del trabajo permite apreciar con claridad el alcance real de las mejoras introducidas.

En su configuración original, el vehículo ofrecía una base mecánica bastante útil como punto de partida, sobre todo por su sistema de orugas, su tamaño reducido y la sencillez de su estructura. Estas características hacían de él una plataforma válida para plantear una transformación posterior. Sin embargo, sus posibilidades reales estaban muy limitadas por la electrónica de serie, ya que estaba pensada para un uso recreativo. Esto reducía tanto la capacidad de control del sistema como las opciones de incorporar nuevos subsistemas o adaptar el vehículo a unas necesidades distintas de las previstas inicialmente.

La versión modificada supera buena parte de esas limitaciones. La principal diferencia no está tanto en la base mecánica, que se conserva, como en la arquitectura del sistema. El control pasa a estar centralizado en la Pixhawk, haciéndolo mucho más flexible y configurable. Gracias a ello, el vehículo deja de depender de una electrónica fija y pasa a apoyarse en una plataforma abierta, en la que pueden definirse entradas, salidas, funciones auxiliares y parámetros ajustables.

Otra diferencia importante aparece en la capacidad de integración. Mientras que en el vehículo de serie el margen para añadir nuevas funciones era muy reducido, en el prototipo modificado ha sido posible incorporar un sistema de orientación de cámara en dos ejes, controlado desde la emisora mediante canales auxiliares específicos. Este cambio demuestra que la plataforma puede asumir nuevas funciones sin perder coherencia ni funcionalidad.

La comparación también refleja una mejora clara en la forma de operar el sistema. Una vez incorporado el nuevo modo de control, algunas acciones básicas de puesta en servicio seguían requiriendo el uso del ordenador y de *Mission Planner*, lo que resultaba poco práctico para el empleo habitual del vehículo. Con la incorporación del armado y desarmado desde la emisora, esta limitación queda resuelta y el sistema presenta una secuencia de uso más ágil y cercana a un funcionamiento real.

En cuanto a la movilidad, la base de orugas ya ofrecía una solución adecuada en el vehículo de partida, y esa ventaja se mantiene en la versión modificada. No obstante, el sistema final introduce una mejora indirecta en este aspecto, ya que el operador no solo controla el desplazamiento del vehículo, sino que también puede hacer uso de elementos auxiliares que amplían sus posibilidades de uso y hacen más eficaz la explotación del conjunto.

En lo relativo a la autonomía, la versión modificada también presenta una mejora respecto al vehículo original. Esto se debe, en primer lugar, a la incorporación de una nueva batería, con mayor capacidad y más adecuada a las necesidades del sistema desarrollado. Esta solución no solo permite aumentar el tiempo de funcionamiento del vehículo, sino que además deja abierta la posibilidad de instalar la batería que se considere más conveniente en función de las exigencias de cada configuración. De este modo, el prototipo gana no solo en autonomía energética, sino también en flexibilidad, al no quedar condicionado a la alimentación limitada del sistema de serie.

Uno de los avances más significativos se aprecia en la capacidad de observación remota. El vehículo de serie no disponía de una función de vídeo ni de una capacidad de visualización. En cambio, la versión desarrollada sí integra una cámara montada sobre un sistema orientable en dos ejes y, además, un sistema FPV basado en Raspberry Pi 4B y cámara USB que permite retransmitir la imagen a un dispositivo móvil. A esto se suma que, tras la configuración realizada, el sistema es capaz de iniciar automáticamente la retransmisión al alimentar la Raspberry y mantener una dirección IP fija dentro de la red empleada en las pruebas, lo que simplifica considerablemente su uso. Con ello, el prototipo no solo queda preparado para futuras mejoras en el ámbito de la observación, sino que ya incorpora una capacidad funcional básica de visualización remota de la que el vehículo de partida carecía.

Más allá de las mejoras concretas que se han ido introduciendo, uno de los aspectos más importantes del prototipo es que deja preparado el camino para seguir desarrollándolo en el futuro. El vehículo original estaba pensado para un uso muy concreto y ofrecía poco margen para añadir nuevas capacidades. En cambio, la versión obtenida tras este trabajo se ha configurado con una idea mucho más abierta, de manera que en adelante se le puedan incorporar nuevos sensores, funciones o sistemas complementarios.

En conjunto, la diferencia entre ambas configuraciones, reflejado en la Figura 4-1, no se limita a una mejora puntual de algunos elementos, sino que afecta a la forma de entender el vehículo como sistema. Mientras que la versión original ofrecía una base útil, aunque cerrada y poco adaptable, el prototipo desarrollado constituye una plataforma más versátil, más configurable y mejor preparada para futuras ampliaciones.

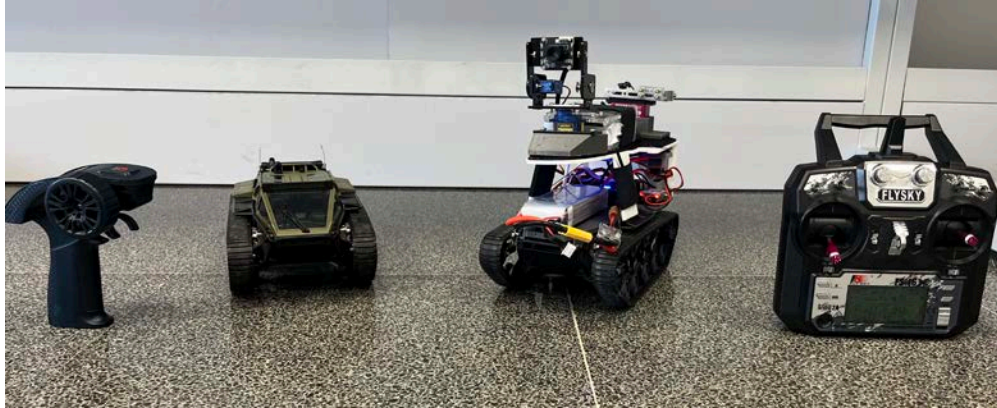


Figura 4-1 Comparación del vehículo de serie y el configurado

4.4 Resultados del ensamblaje y de la integración física

El ensamblaje final del prototipo permitió comprobar que la integración física de los nuevos componentes dentro del vehículo era viable y que la base seleccionada ofrecía un espacio suficiente para albergar una arquitectura más compleja que la original. Este aspecto era especialmente importante, ya que una parte fundamental del trabajo consistía en adaptar la distribución interna del sistema sin comprometer la estabilidad ni el funcionamiento general del conjunto.

La instalación de la Pixhawk, del receptor RC, del sistema de orientación de cámara y del cableado necesario permitió comprobar que el vehículo podía pasar de una configuración sencilla a otra bastante más completa sin que ello supusiera una pérdida clara de orden en el conjunto. Aunque el espacio disponible en una plataforma de este tamaño es limitado, la integración lograda demuestra que es posible organizar de forma razonable los elementos principales del sistema dentro del vehículo, tal como se muestra en la Figura 4-2.

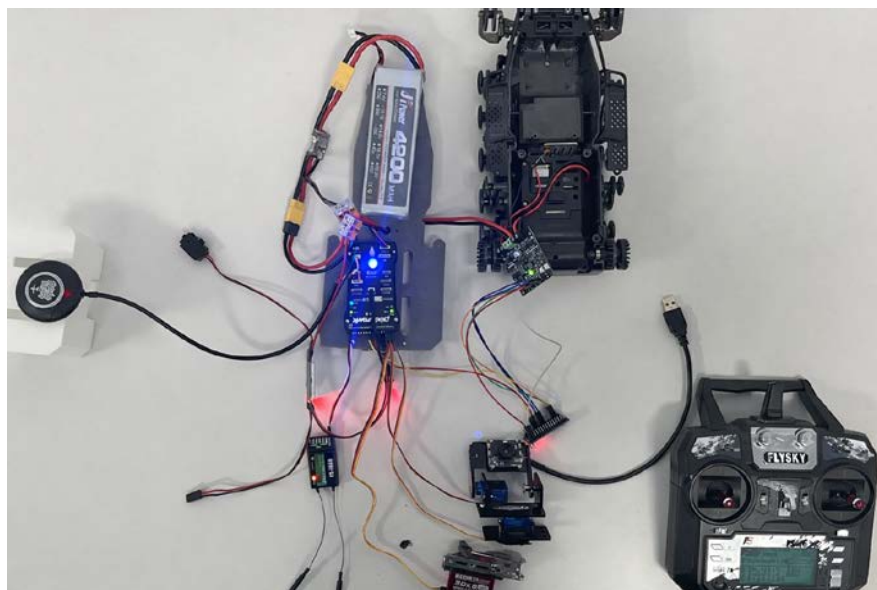


Figura 4-2 Configuración de la electrónica

Un aspecto especialmente importante dentro de esta integración fue la distribución de los componentes. En un vehículo de dimensiones reducidas, la ubicación de cada elemento influye directamente en el aprovechamiento del espacio, en la accesibilidad durante el montaje y mantenimiento, y en la posibilidad de seguir ampliando el sistema más adelante. En este caso, la organización final permitió disponer la electrónica principal sin que el conjunto quedase desordenado.

Este resultado también pone en valor el uso previo del modelado CAD como apoyo al diseño. La integración física no se llevó a cabo únicamente a base de pruebas sucesivas, sino que partió de una planificación previa que ayudó a decidir la ubicación de los componentes y a aprovechar mejor el espacio disponible. Gracias a ello, el prototipo no solo pudo montarse, sino que además quedó organizado con una distribución interna coherente.

4.5 Ensayo de movilidad básica en interior

Una vez completado el ensamblaje del prototipo y comprobado el funcionamiento general de sus principales subsistemas, se llevó a cabo un ensayo de movilidad básica en interior con el objetivo de validar el comportamiento del vehículo en un entorno controlado. La prueba se planteó como una verificación práctica del sistema completo, no solo desde el punto de vista del desplazamiento, sino también de la utilidad real de la capacidad FPV incorporada al UGV.

El ensayo se desarrolló en el interior del laboratorio, utilizando como escenario dos habitaciones de este. La idea de la prueba consistió en situar inicialmente el vehículo en una de las habitaciones y conducirlo hasta la otra haciendo uso de la imagen recibida a través de la retransmisión de vídeo. De este modo, el ensayo no se limitaba únicamente a comprobar si el vehículo era capaz de moverse, sino también a evaluar hasta qué punto la cámara embarcada y el sistema FPV podían aportar una referencia visual útil durante la conducción en un entorno interior.

La prueba se realizó en modo manual, gobernando el vehículo desde la emisora y combinando la observación directa del entorno con la imagen recibida en el dispositivo móvil mediante VLC. En una primera fase se verificaron las maniobras básicas de avance, retroceso y giro dentro de la habitación de partida, con el fin de comprobar la respuesta general del sistema antes de iniciar el desplazamiento hacia la segunda estancia

Durante estas primeras maniobras, el UGV mostró un comportamiento correcto. El desplazamiento en línea recta se realizó de forma estable, sin oscilaciones apreciables ni pérdidas de control, y las maniobras de giro respondieron de forma coherente a las órdenes dadas desde la emisora. En este sentido, el ensayo permitió confirmar que la nueva configuración de control sobre la plataforma era plenamente válida para un uso básico en interior y que la configuración final del vehículo no había comprometido la movilidad propia del sistema de orugas.

Una vez comprobada esta respuesta inicial, se procedió al desplazamiento entre ambas habitaciones. En esta parte del ensayo, la capacidad FPV adquirió un papel mucho más relevante, ya que la conducción comenzó a apoyarse de forma más clara en la imagen transmitida por la cámara. La visualización remota permitió al operador disponer de una referencia directa del recorrido del vehículo, de su orientación respecto al paso entre estancias y de la presencia de elementos próximos dentro de la trayectoria como se puede apreciar en la Figura 4-3.



Figura 4-3 Ensayo de movilidad

Este punto tuvo especial interés porque permitió comprobar que la integración de la Raspberry Pi 4B, la cámara USB y el sistema de retransmisión configurado aportaba una función realmente utilizable durante la operación del vehículo.

Durante la prueba también se puso de manifiesto una de las limitaciones, la latencia de la imagen. Aunque el sistema funcionó correctamente y la retransmisión se mantuvo operativa, el retardo seguía siendo perceptible, lo que obligaba a conducir con cierta precaución y a no depender exclusivamente del vídeo en maniobras que requiriesen una respuesta inmediata. Aun así, incluso con esta limitación, el ensayo confirmó que la capacidad FPV era lo bastante funcional como para aportar una ayuda visual real en desplazamientos de interior y en recorridos sencillos entre espacios próximos.

Además del comportamiento del sistema de vídeo, la prueba permitió valorar de manera indirecta la integración física del prototipo. A pesar de la incorporación de nuevos componentes, como la Pixhawk, el receptor RC, la Raspberry Pi, la cámara y el resto del cableado asociado, el vehículo mantuvo un funcionamiento estable y una respuesta coherente durante todo el ensayo. Esto confirmó que la distribución adoptada para la electrónica y los elementos auxiliares no comprometía el comportamiento básico del conjunto y que la plataforma seguía siendo operativa una vez completado el montaje.

En definitiva, durante el ensayo el vehículo fue capaz de desplazarse, maniobrar y completar un recorrido entre dos estancias del laboratorio manteniendo una respuesta satisfactoria al control remoto. Al mismo tiempo, la prueba sirvió para comprobar que la capacidad FPV desarrollada no solo era funcional desde el punto de vista técnico, sino también útil en la práctica como apoyo a la conducción y a la observación del entorno. Aunque la latencia sigue limitando su empleo como único medio de guiado en situaciones que requieran gran precisión, el sistema demostró ser válido como herramienta de supervisión visual y como mejora real respecto a la configuración original del vehículo.

4.6 Ensayo de desplazamiento sobre distintos escenarios

Una vez verificada la movilidad básica del vehículo en interior, se planteó una segunda fase de pruebas orientada a comprobar su comportamiento sobre distintos escenarios. El objetivo de este ensayo no era únicamente observar si el UGV podía desplazarse en terrenos diferentes, sino valorar cómo respondía la plataforma en contextos variados que, por sus características, pueden guardar relación con escenarios de empleo razonablemente próximos a los que podrían plantearse para un vehículo de estas dimensiones.

La prueba se desarrolló en varios entornos con superficies diferenciadas, buscando precisamente someter al vehículo a condiciones distintas de adherencia, regularidad y resistencia al avance. Para ello se realizaron recorridos y maniobras en la explanada de la Escuela Naval Militar, en el muelle de torpedos, en la playa de Puzol, en la pista militar y en los pasillos del cuartel Marqués de la Victoria. La intención de esta variedad fue comprobar si la configuración final obtenida era capaz de mantener un

funcionamiento aceptable en superficies que representasen desde espacios interiores y pavimentados hasta zonas abiertas con terreno blando o irregular.

En la explanada de la Escuela Naval Militar, el ensayo se realizó sobre una superficie dura y regular, lo que permitió comprobar el comportamiento del vehículo en un entorno exterior despejado y fácilmente controlable. En estas condiciones, el UGV mostró una respuesta satisfactoria, con un desplazamiento estable y una maniobrabilidad correcta tanto en línea recta como en maniobras de giro y cambios de dirección. Este escenario resultó especialmente útil como referencia, ya que permitía observar el comportamiento del conjunto sin que la superficie introdujese dificultades añadidas. Desde el punto de vista práctico, tal y como se muestra en la Figura 4-4, la explanada puede entenderse como un entorno representativo de zonas abiertas de tránsito o de preparación previa al acceso a áreas más complejas.



Figura 4-4 Ensayo en la explanada

En el muelle de torpedos, la prueba volvió a desarrollarse sobre una superficie dura, aunque en este caso en un entorno más expuesto y con un carácter más próximo a un espacio portuario o de infraestructura. El comportamiento del vehículo fue igualmente satisfactorio, manteniendo una buena capacidad de avance y giro. Esta parte del ensayo tuvo interés porque permitió comprobar que la plataforma podía desplazarse con normalidad sobre superficies firmes en un escenario exterior distinto al anterior, reforzando así la idea de que el UGV mantiene una movilidad correcta en espacios abiertos pavimentados. Además, este tipo de entorno resulta representativo de zonas logísticas, muelles, accesos o superficies de tránsito en las que un vehículo terrestre de pequeño tamaño podría requerirse como apoyo, como se aprecia en la Figura 4-5.



Figura 4-5 Ensayo en la pista militar

Una prueba especialmente significativa fue la realizada en la playa de Puzol, tal como se aprecia en la Figura 4-6, ya que permitió observar la respuesta del vehículo sobre arena, es decir, sobre una superficie claramente más exigente que las anteriores. En este caso, el comportamiento del UGV puso de manifiesto tanto sus capacidades como sus limitaciones. Por un lado, el sistema de orugas demostró

ser una solución razonablemente adecuada para mantener el avance sobre terreno blando, especialmente en zonas donde la arena se encontraba algo más compactada. Por otro, también se observó que el esfuerzo requerido al sistema aumentaba y que la movilidad se veía más penalizada que sobre superficies duras, especialmente en giros cerrados o en zonas de arena más suelta. Aun así, la prueba permitió comprobar que el vehículo no quedaba limitado exclusivamente a entornos pavimentados y que podía desenvolverse, al menos de forma básica, sobre un terreno más próximo a un escenario con estas características, lo que resulta especialmente interesante teniendo en cuenta el contexto general del proyecto.



Figura 4-6 Ensayo en arena

El ensayo realizado sobre césped en la pista militar, como se aprecia en la Figura 4-7, permitió añadir una condición intermedia entre las superficies duras y la arena. En este entorno, el vehículo mantuvo un comportamiento aceptable, con una capacidad de avance suficiente y una maniobrabilidad correcta dentro de lo esperable para una plataforma de estas dimensiones. El césped introducía una resistencia al avance superior a la de una superficie pavimentada, pero sin llegar a penalizar tanto la movilidad como lo hacía la arena. Esta parte de la prueba tuvo interés porque representa un tipo de terreno frecuente en zonas abiertas, márgenes de caminos o poblaciones, por lo que aporta una referencia útil sobre la versatilidad real del prototipo.



Figura 4-7 Ensayo en la pista militar

Por último, el ensayo en los pasillos del cuartel Marqués de la Victoria permitió volver a un entorno interior, aunque con un enfoque distinto al del laboratorio, como muestra en la Figura 4-8. En este caso,

la prueba sirvió para comprobar la maniobrabilidad del UGV en espacios más estrechos, con recorridos más canalizados y una necesidad mayor de controlar la orientación del vehículo durante los desplazamientos. El comportamiento observado fue satisfactorio, y permitió confirmar que la plataforma conserva una buena capacidad de maniobra en interiores, incluso cuando el espacio disponible es más limitado. Además, en este tipo de recorrido la cámara embarcada y el sistema FPV volvieron a mostrar su utilidad como apoyo visual, especialmente en cambios de dirección o en tramos donde la visión directa del operador podía resultar menos cómoda.



Figura 4-8 Ensayo en el cuartel Marqués de la Victoria

Estos ensayos permitieron comprobar que la plataforma desarrollada mantiene una movilidad funcional en superficies muy distintas entre sí. Como era de esperar, el mejor comportamiento se observó sobre superficies firmes y regulares, donde el vehículo ofreció una respuesta más estable y predecible. Sin embargo, también quedó demostrado que el sistema de orugas permite conservar un grado de operatividad razonable sobre terrenos menos favorables, como el césped o la arena, aunque con una penalización clara en términos de esfuerzo, fluidez de movimiento y facilidad de maniobra.

Desde el punto de vista del proyecto, esta fase de pruebas tuvo importancia porque permitió valorar el comportamiento del UGV en escenarios que pueden asociarse a posibles contextos de empleo real como interiores estrechos, superficies pavimentadas de tránsito, zonas abiertas, áreas ajardinadas o entornos litorales.

En definitiva, el ensayo de desplazamiento sobre distintas superficies confirmó que la transformación realizada sobre la plataforma original no solo ha permitido mejorar la configuración electrónica y las posibilidades de control, sino también mantener una capacidad de movilidad coherente con el uso que puede esperarse de un UGV de pequeño tamaño.

4.7 Resultados del sistema de orientación de cámara

La incorporación del sistema de orientación de cámara permitió comprobar que el vehículo no solo era capaz de moverse y retransmitir imagen, sino también de cambiar la dirección de la cámara mientras estaba en funcionamiento. Esto tiene bastante interés, ya que mejora de forma clara la utilidad del sistema de observación y permite al operador ver mejor el entorno sin tener que recolocar continuamente el UGV.

Durante las pruebas, el sistema respondió correctamente a las órdenes enviadas desde la emisora y permitió mover la cámara en los dos ejes previstos. Gracias a ello, el operador pudo variar el campo de

visión de forma remota, lo que facilita la observación de zonas concretas del entorno sin necesidad de mover todo el vehículo.

Desde un punto de vista práctico, esta capacidad aporta una mejora clara al sistema FPV. Aunque el vehículo sigue desplazándose bajo control del operador, la posibilidad de orientar la cámara permite explorar mejor el entorno antes de avanzar o mientras se realiza una maniobra. Esto resulta especialmente útil en espacios interiores, en pasillos, en accesos estrechos o en situaciones en las que interesa observar con más detalle una zona concreta.

Las pruebas también permitieron comprobar que el sistema funciona de forma suficientemente estable dentro del uso previsto para el prototipo. La cámara respondió de manera coherente a las órdenes dadas y aportó una mejora real en la observación del entorno.

En conjunto, el sistema de orientación de cámara puede considerarse uno de los resultados más interesantes del prototipo, ya que amplía de forma clara las posibilidades del vehículo. Su combinación con la cámara embarcada y con el sistema FPV mejora la capacidad de observación del UGV y refuerza la idea de que la plataforma desarrollada no se limita únicamente al desplazamiento, sino que puede asumir funciones complementarias con utilidad práctica real.

4.8 Resultados de la configuración y validación en Mission Planner

La configuración realizada en *Mission Planner* permitió comprobar que la nueva organización del vehículo no solo estaba correctamente montada, sino que además era reconocida e interpretada de forma adecuada por la Pixhawk. Este punto fue importante dentro del desarrollo del prototipo, ya que una integración física correctamente resuelta solo adquiere verdadero sentido cuando las señales y funciones del sistema son gestionadas de manera coherente por el autopiloto.

Uno de los resultados más relevantes fue la correcta detección de los canales procedentes de la emisora. A través de la pantalla *Radio Calibration* se pudo verificar que tanto los canales principales, destinados al control del movimiento del vehículo, como los canales auxiliares, asociados a otras funciones, llegaban correctamente a la controladora. Esta comprobación permitió confirmar que la distribución de canales definida durante la configuración no quedaba solo planteada a nivel teórico, sino que se correspondía con una respuesta real dentro del sistema.

Otro resultado importante fue la posibilidad de ajustar determinados parámetros del sistema para adaptar su comportamiento a las necesidades concretas del proyecto. La utilización de la pantalla *Full Parameter List* permitió asociar funciones específicas a distintos canales y completar la configuración del vehículo. Esto supuso una diferencia clara respecto al sistema original, ya que la nueva arquitectura dejaba de estar limitada por una electrónica cerrada y pasaba a ofrecer un mayor margen de ajuste y personalización.

Esta capacidad de configuración resultó especialmente útil en funciones como el control de los servos de la cámara o el armado del sistema desde la emisora. En ambos casos, *Mission Planner* permitió verificar que las entradas correspondientes eran reconocidas por la controladora y que podían asociarse a la función deseada dentro de ArduPilot. De esta forma, la herramienta no se utilizó únicamente para modificar parámetros, sino también para comprobar que cada una de las nuevas capacidades del prototipo quedaba correctamente integrada.

Además, *Mission Planner* desempeñó un papel importante como herramienta de comprobación durante todo el proceso. Su uso permitió revisar el estado del sistema, confirmar el comportamiento de los canales y validar distintas funciones a medida que se iban incorporando al vehículo. Esto facilitó una integración más ordenada y redujo la incertidumbre durante la puesta a punto del prototipo, ya que cada modificación podía comprobarse de forma directa antes de seguir avanzando con el resto del sistema.

4.9 Resultados del armado desde la emisora

Uno de los resultados operativos más claros obtenidos en la fase final del desarrollo fue la posibilidad de armar y desarmar el UGV directamente desde la emisora. Esta mejora, aunque más discreta que otras desde el punto de vista visual, tiene una repercusión práctica importante, ya que modifica de forma clara la secuencia de preparación del vehículo.

Antes de introducir esta mejora, el armado del sistema requería conectar la Pixhawk al ordenador mediante USB y realizar la acción desde *Mission Planner*. Aunque este procedimiento resultaba válido durante las fases de configuración y prueba, suponía una solución poco práctica para el uso habitual del vehículo. La modificación realizada permitió suprimir esa dependencia en una acción básica de puesta en servicio, mejorando así la operatividad del conjunto.

La validación funcional de esta modificación confirmó que, una vez configurado el canal correspondiente y asignada en ArduPilot la función de armado y desarmado, el accionamiento del interruptor seleccionado en la emisora provocaba correctamente el cambio de estado del sistema, tal y como se aprecia en la Figura 3-58. Este resultado supuso una mejora clara en la operatividad del prototipo, al reducir la necesidad de recurrir al ordenador para tareas básicas y permitir una relación más directa y ágil entre el operador y el vehículo.

4.10 Valoración del empleo de un UGV en operaciones militares

Una vez desarrollado y validado el prototipo, resulta de interés valorar su posible empleo en escenarios donde una plataforma terrestre no tripulada de pequeño tamaño pueda aportar utilidad táctica. El vehículo, aún en fase de experimentación, permite plantear con bastante claridad varios casos de uso en los que un UGV ligero, controlado de forma remota, con capacidad FPV y posibilidad de liberar una pequeña carga, puede contribuir a reducir la exposición del personal y ampliar la capacidad de reconocimiento inmediato. Más que sustituir al combatiente, el vehículo aporta valor al permitir adelantar una presencia remota en aquellos puntos donde la entrada inmediata del personal entrañaría un riesgo innecesario.

Tomando como referencia la doctrina táctica nacional del pelotón de fusiles, el posible empleo del UGV puede ordenarse según los principales tipos de operaciones en los que participa la unidad. Atendiendo a sus capacidades reales, su utilidad se sitúa sobre todo como medio auxiliar de apoyo al pelotón, especialmente para ampliar la observación, reducir la exposición del personal y facilitar la obtención previa de información sobre el terreno y el enemigo.

4.10.1 Operaciones ofensivas

Dentro de las operaciones ofensivas, el empleo del UGV resulta más coherente durante la marcha de aproximación, en cometidos de reconocimiento y en acciones sobre posiciones defensivas fortificadas. La propia publicación prevé que, en la marcha de aproximación, una sección o compañía pueda emplear sus propios elementos de reconocimiento, normalmente un equipo de fuego, para avanzar por delante y obligar al enemigo a descubrir su despliegue. En ese contexto, el UGV podría aportar utilidad como medio adelantado de observación en aquellos puntos donde el jefe de pelotón quiera confirmar la presencia de una amenaza, comprobar un paso o reducir la exposición inicial del elemento en cabeza. Por ejemplo, podría ser útil antes de rebasar una zona donde se sospeche un nido de ametralladora, una posición de armas colectivas o un obstáculo cubierto por el fuego enemigo.

Su empleo también tendría interés en el ataque a posiciones defensivas fortificadas, como se aprecia en la Figura 4-9, especialmente en la aproximación a obstáculos de protección, búnkeres o sistemas de trincheras. La doctrina insiste en que este tipo de ataque exige un planeamiento detallado y que el pelotón debe enfrentarse a alambradas, minas, artefactos explosivos improvisados, trampas y otros obstáculos. En una situación así, el UGV podría emplearse antes de abrir la brecha para obtener una primera observación del punto de entrada, detectar si el obstáculo está cubierto por fuegos inmediatos o comprobar si la posición presenta alguna vulnerabilidad desde el flanco o la retaguardia. Su valor no

estaría en sustituir al equipo de apertura ni al elemento de asalto, sino en ayudar a que el pelotón llegue a ese momento con una apreciación previa más precisa.



Figura 4-9 Empleo de un UGV en una operación ofensiva [Autoría propia uso de IA]

4.10.2 Operaciones defensivas

En las operaciones defensivas, el encaje del UGV es más claro en relación con la seguridad local, la ocupación de la defensa y la prioridad de los trabajos. La publicación subraya que la defensa debe organizarse manteniendo la seguridad desde el primer momento, y que el orden normal de los trabajos es seguridad, armas y campos de tiro, atrincherarse o construir posiciones de combate, seleccionar posiciones suplementarias y alternativas, obstáculos y camuflaje / enmascaramiento. En ese marco, el UGV podría aportar utilidad durante la fase inicial de ocupación, cuando el pelotón todavía está desplegando la seguridad, asignando sectores de tiro y comenzando a preparar las posiciones, tal como muestra la Figura 4-10. Por ejemplo, podría utilizarse para revisar de forma rápida una avenida de aproximación, un espacio muerto delante de la posición o una zona donde el terreno impida una observación cómoda desde la línea principal.

También podría tener interés cuando el pelotón prepare posiciones suplementarias y alternativas. La publicación indica que estas posiciones deben planearse y prepararse, y que, siempre que sea posible, el movimiento entre ellas debe hacerse por rutas cubiertas y ocultas. En ese contexto, el UGV podría emplearse para comprobar previamente una de esas rutas, verificar si el terreno permite el desplazamiento o confirmar que una posición suplementaria mantiene el sector de observación que se busca. Del mismo modo, durante una parada prolongada o durante la ocupación de una posición de forma inmediata, donde la mitad del pelotón se atrincheró mientras la otra mitad proporciona la seguridad, el vehículo puede servir para reforzar esa seguridad inmediata sin aumentar el número de hombres expuestos.



Figura 4-10 Empleo de un UGV en una operación defensiva [Autoría propia uso de IA]

4.10.3 Patrullas

El capítulo de patrullas es, probablemente, donde el empleo del UGV presenta un encaje más natural. La publicación distingue entre patrulla de seguridad y patrulla de reconocimiento, y dentro de esta última desarrolla de forma muy concreta el papel del elemento de reconocimiento, cuyo propósito es responder a las necesidades de información para facilitar la toma de decisiones tácticas. Además, señala que el reconocimiento y la vigilancia son acciones encaminadas a obtener información, diferenciándose en que la vigilancia se realiza mediante asentamientos fijos y camuflados e implica observación continua desde posiciones estáticas, mientras que el reconocimiento implica movimiento.

Sobre esa base, el UGV podría integrarse como un medio de apoyo al elemento de reconocimiento para adelantarse sobre el itinerario y contribuir a determinar rutas transitables o avenidas de aproximación potenciales, inspeccionar y clasificar puentes, pasos elevados o inferiores y sistemas de alcantarillado, reconocer obstáculos naturales y artificiales o comprobar la existencia de un paso alternativo. La Figura 4-11 muestra un ejemplo de aplicación del UGV en una patrulla.

La propia doctrina añade que el elemento de reconocimiento puede reconocer el terreno hasta el límite del alcance de las armas de fuego directo, localizar cruces y vados en las proximidades de los puentes y, en caso necesario, localizar un paso alternativo o reducir, abrir brechas, limpiar y marcar sobre carriles, desfiladeros y otros terrenos restrictivos, campos de minas, áreas contaminadas u otros obstáculos a lo largo del itinerario. En una patrulla de este tipo, el UGV tendría sentido precisamente como apoyo en esos cometidos, permitiendo una primera observación del punto o del itinerario antes de que lo haga el elemento en cabeza. Su utilidad sería aún mayor en el cruce de zonas peligrosas, donde la publicación dedica un apartado específico y prevé acciones concretas para reducir la vulnerabilidad de la patrulla. En ese contexto, el vehículo podría servir como apoyo previo al cruce, especialmente cuando la patrulla no quiera delatar todavía la posición del grueso.



Figura 4-11 Empleo de un UGV en una patrulla [Autoría propia uso de IA]

4.10.4 Operaciones militares en terreno urbanizado (MOUT)

En MOUT, el UGV también presenta un empleo coherente. La publicación desarrolla el movimiento exterior, las zonas peligrosas, el acordonamiento y búsqueda (*cordon and search*), el movimiento interior, los procedimientos generales de limpieza, los procedimientos de limpieza específicos y los puntos de control (*checkpoints*). Dentro de ese marco, el UGV puede aportar utilidad como medio auxiliar de apoyo a la progresión de la unidad, especialmente cuando interese obtener una primera apreciación visual antes de comprometer al personal. Así, durante el movimiento exterior podría emplearse en relación con una zona peligrosa; en el acordonamiento y búsqueda, como apoyo puntual al cordón interior o a la fase de limpieza; y en el movimiento interior, antes de aplicar los procedimientos de limpieza en pasillos, intersecciones o escaleras, como refleja la Figura 4-12.

Su empleo también tendría sentido en los puntos de control, no como elemento principal del dispositivo, sino como apoyo puntual para aumentar la observación sobre el vehículo que se está revisando, la zona inmediata del control o los puntos próximos que interesen al jefe de pelotón. Del mismo modo, en los procedimientos de limpieza específicos, como la limpieza con apoyo, las intersecciones en forma de “L” o de “T”, las escaleras o la limpieza de la retaguardia, el vehículo podría servir para obtener una primera referencia visual antes de comprometer al elemento de limpieza. En todos estos casos, el UGV no sustituiría a la pequeña unidad ni a sus procedimientos, pero sí podría reducir parte de la incertidumbre inicial y apoyar la progresión con una observación previa del espacio inmediato.



Figura 4-12 Operaciones militares en terreno urbanizado (MOUT) [Autoría propia uso de IA]

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Descripción del apartado

En este apartado se recogen las principales conclusiones obtenidas tras el desarrollo del trabajo, valorando tanto el resultado final alcanzado como las limitaciones observadas durante el proceso. Del mismo modo, se plantean varias líneas futuras que permitirían dar continuidad al proyecto y seguir mejorando la plataforma desarrollada a partir de la base funcional conseguida.

5.2 Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo la transformación de un vehículo comercial de uso recreativo en una plataforma terrestre no tripulada con mayores posibilidades de control, configuración y ampliación. El resultado final permite afirmar que el objetivo principal del proyecto se ha cumplido, ya que se ha conseguido desarrollar una base funcional sobre la que trabajar con una arquitectura mucho más abierta que la original y con un grado de operatividad claramente superior al del vehículo de partida.

Uno de los aspectos más importantes del trabajo ha sido comprobar que un vehículo comercial sencillo puede servir como punto de partida para desarrollar un UGV de bajo coste. Aunque la plataforma original presentaba bastantes limitaciones, sobre todo por la electrónica de serie y por su planteamiento cerrado, la sustitución de esos elementos por una nueva arquitectura basada en Pixhawk ha permitido obtener un sistema mucho más flexible y con mayores posibilidades de evolución.

El proyecto también ha permitido comprobar que lo importante no ha sido solo sustituir unos componentes por otros, sino replantear el funcionamiento del conjunto como un sistema integrado. La integración del sistema de control, la alimentación, el receptor RC y los distintos elementos auxiliares ha dado como resultado una plataforma más sólida a nivel técnico, más próxima a un sistema de pruebas o experimentación que a un simple vehículo recreativo modificado.

Además, el trabajo no se ha limitado únicamente a lograr el movimiento del vehículo. La incorporación de elementos auxiliares, como los servos, demuestra que la plataforma puede ir más allá del simple desplazamiento y asumir funciones complementarias. En esta misma línea, la integración de una cámara embarcada y de un sistema FPV basado en Raspberry Pi 4B ha supuesto un avance significativo, ya que ha permitido dotar al UGV de una capacidad FPV. A ello se añade que, tras el proceso de configuración realizado, se logró que el sistema iniciase la retransmisión de forma automática al alimentar la Raspberry y que el acceso al vídeo pudiera realizarse siempre desde una dirección IP fija conocida. Con ello, el vehículo dejó de depender de un monitor o de un ordenador para la puesta en servicio de esta función, lo que mejora de forma clara su autonomía operativa.

En general, puede decirse que el trabajo ha permitido alcanzar una solución coherente con los objetivos planteados al inicio. Se ha obtenido una plataforma funcional, de bajo coste y con una base técnica suficientemente sólida como para seguir mejorándola en el futuro. Al mismo tiempo, el desarrollo ha servido para afrontar problemas reales de integración, montaje, configuración y validación, lo que aporta al proyecto un gran valor.

5.3 Limitaciones

A pesar de los resultados obtenidos, conviene señalar que el vehículo desarrollado presenta también algunas limitaciones. La primera de ellas está relacionada con el propio punto de partida del proyecto. Haber trabajado sobre una base comercial ha permitido simplificar parte del desarrollo y mantener el coste en unos márgenes reducidos, pero al mismo tiempo ha condicionado varias decisiones de diseño. Tanto la estructura como los materiales y determinados aspectos mecánicos ya venían definidos desde el inicio, lo que ha reducido el margen de adaptación y de optimización que habría ofrecido una plataforma concebida específicamente desde cero.

También debe tenerse en cuenta que el vehículo desarrollado debe entenderse como un prototipo, y no como una solución completamente terminada. Aunque el comportamiento general del sistema es convincente, todavía existen aspectos mejorables, como la organización del cableado, la protección de determinados componentes, la distribución interna de la electrónica o la solidez del montaje. Se trata de cuestiones que no impiden su funcionamiento, pero que sí condicionan el grado de acabado del conjunto.

En relación con la capacidad de observación, se ha conseguido integrar una cámara embarcada y desarrollar un sistema FPV operativo, lo que supone una mejora clara respecto a la configuración inicial del vehículo. No obstante, su puesta en marcha ha requerido numerosas pruebas y ajustes hasta alcanzar una configuración estable. Aunque finalmente se logró una solución funcional, con arranque automático y acceso remoto desde un dispositivo móvil, la latencia del sistema sigue siendo una limitación importante. Tras la optimización realizada, el retardo se redujo hasta valores del orden de 2 segundos, lo que permite utilizar esta capacidad como apoyo visual y supervisión remota, pero no la convierte todavía en una solución ideal para una conducción de precisión basada exclusivamente en visión en primera persona. A ello se suma, además, que el sistema no dispone de visión nocturna, por lo que su empleo queda condicionado a entornos con una iluminación suficiente.

Por último, otra limitación del trabajo es que la fase de pruebas se ha realizado dentro de unas condiciones concretas de tiempo y medios. Esto ha permitido validar el funcionamiento general del vehículo, pero no llevar a cabo una serie de ensayos más amplia que permita medir con detalle aspectos como la autonomía real, el comportamiento sobre distintos terrenos o el rendimiento continuado del sistema. Por ello, aunque la viabilidad del conjunto ha quedado demostrada, todavía sería necesario seguir probándolo para conocer mejor sus límites.

5.4 Líneas futuras

A partir del trabajo realizado, quedan abiertas varias líneas de continuidad que permitirían seguir desarrollando la plataforma y aumentar de forma progresiva sus capacidades. Una de las mejoras más inmediatas pasaría por seguir perfeccionando la integración general del vehículo, especialmente en aspectos como la disposición de los componentes, la organización del cableado, la protección de la electrónica y la solidez del montaje. Aunque el prototipo desarrollado ha alcanzado un funcionamiento satisfactorio, este tipo de mejoras permitiría obtener un conjunto más limpio, más robusto y fiable en un uso continuado.

Otra línea futura clara estaría relacionada con la evolución del sistema de observación embarcada. La integración de la Raspberry Pi y de la cámara USB ha permitido dotar al UGV de una capacidad FPV funcional, pero todavía existe margen de mejora en aspectos como la calidad de imagen, la latencia, la estabilidad del enlace o la comodidad de uso. En una fase posterior podría plantearse la incorporación de una solución de vídeo más optimizada, con menor retardo y un comportamiento más estable en distintas condiciones de empleo. Del mismo modo, también sería interesante complementar esta

capacidad con visión nocturna o con cámaras de mejor rendimiento en situaciones de baja iluminación, lo que ampliaría notablemente el campo de empleo del vehículo.

Dentro de esta misma línea, otra mejora interesante sería avanzar hacia una integración todavía más autónoma del sistema FPV. Aunque en este trabajo se ha logrado automatizar el arranque de la retransmisión y fijar una dirección IP estable, en el futuro podría plantearse una solución de red propia del vehículo, de manera que el sistema no dependiese de una red externa concreta para su funcionamiento. Esto reforzaría aún más la autonomía práctica del conjunto y haría más sencilla su puesta en servicio en distintos escenarios.

A un nivel de mayor alcance, una evolución especialmente interesante sería desarrollar un sistema de percepción embarcada capaz no solo de mostrar imagen al operador, sino también de interpretar lo que está observando. A partir de la cámara ya incorporada, una línea futura de mayor alcance podría consistir en implementar algoritmos de reconocimiento visual que permitieran identificar determinados elementos previamente definidos, como objetos, señales, vehículos o personas, y que, una vez detectados, el sistema fuese capaz de monitorizarlos de forma automática. Esta mejora supondría un paso importante, ya que el vehículo dejaría de limitarse a transmitir imagen y pasaría a aportar también una función básica de análisis del entorno. Por su complejidad y por las posibilidades que abre en el ámbito del reconocimiento, esta propuesta tendría entidad suficiente como para constituir por sí sola un nuevo Trabajo de Fin de Grado.

También tendría interés seguir desarrollando las funciones auxiliares de la plataforma. La incorporación de servos y canales adicionales demuestra que el vehículo puede asumir tareas complementarias más allá del desplazamiento. En este sentido, podrían plantearse mecanismos sencillos de interacción con el entorno, como sistemas de liberación de carga ligera, accionamiento de soportes, despliegue de pequeños sensores o apertura y cierre de elementos auxiliares. Este tipo de soluciones permitiría ampliar el valor práctico del UGV.

A medio plazo, otra línea de evolución lógica sería avanzar hacia una estructura más modular. Poder adaptar la plataforma según la función deseada permitiría configurar el vehículo de manera diferente para tareas de observación, transporte ligero, pruebas con sensores o integración de nuevos subsistemas. Esto haría que el UGV ganase versatilidad y facilitaría futuras ampliaciones sin necesidad de rediseñar por completo el conjunto en cada modificación.

Por otra parte, una de las continuaciones más ambiciosas del trabajo sería dotar al vehículo de capacidades de conducción autónoma. Hasta el momento, la plataforma desarrollada funciona bajo control remoto, lo cual resulta coherente con los objetivos planteados en este proyecto. Sin embargo, una evolución posterior podría centrarse en la incorporación de sensores y algoritmos que permitieran al UGV desplazarse de forma autónoma o semiautónoma, siguiendo rutas predefinidas, evitando obstáculos o manteniendo un determinado recorrido sin intervención constante del operador. Este avance supondría una mejora muy significativa desde el punto de vista técnico, ya que implicaría trabajar no solo sobre la movilidad del vehículo, sino también sobre la percepción del entorno, la toma de decisiones y la seguridad de la navegación. Por su alcance, esta línea futura tendría igualmente dimensión suficiente como para dar lugar a un nuevo Trabajo de Fin de Grado.

Finalmente, otra posible continuación del proyecto sería abordar el diseño de una plataforma propia desde cero, tomando como base toda la experiencia obtenida durante este trabajo. Aunque la utilización de un vehículo comercial ha sido una solución adecuada para validar el concepto y construir un primer prototipo, un desarrollo posterior permitiría definir desde el inicio todos los elementos del sistema en función de unas necesidades concretas. Esto haría posible optimizar la estructura del chasis, la distribución de masas, la integración de la electrónica, la protección de los componentes o la capacidad de carga, dando lugar a una solución más consolidada y mejor resuelta desde el punto de vista de ingeniería.

En conjunto, estas posibles líneas futuras dejan ver que el trabajo no termina aquí, sino que abre la puerta a seguir desarrollándolo. El prototipo obtenido ha servido para comprobar que la idea era viable, pero también ha permitido identificar varias mejoras que, en un futuro, podrían hacer que el vehículo fuese más completo, más útil y técnicamente más avanzado.

6 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figurarán todas las referencias, sean recursos web, libros, artículos, etc., incluyendo la información de autores, título de la obra, nombre de la publicación, año, edición y enlace más fecha de último acceso en el caso de referencias a recursos online.

- [1] H.-M. Huang, *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework. Volume I: Terminology. Version 1.1*, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2004.
- [2] National Research Council, *Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles*, The National Academies Press, 2002.
- [3] A. C. Turner, «Trailblazers of Unmanned Ground Vehicles,» *Military Review*, pp. 61-67, 11 2019.
- [4] Fundación Leonardo Torres Quevedo, «Telecontrol,» [En línea]. Available: <https://www.torresquevedo.org/LTQ10/index.php/Telecontrol>. [Último acceso: 28 enero 2026].
- [5] A. Pérez-Yuste, «Early Developments of Wireless Remote Control: The Telekino of Torres-Quevedo,» *Proceedings of the IEEE*, pp. 186-190, enero 2008.
- [6] Quevedo, Museo Torres, «Torres Quevedo: los grandes inventos del creador de la automática,» [En línea]. Available: <https://artsandculture.google.com/story/torres-quevedo-los-grandes-inventos-del-creador-de-la-autom%C3%A1tica-museo-torres->. [Último acceso: 28 enero 2026].
- [7] Technica Curiosa, «A Brief Early History of Unmanned Systems,» [En línea]. Available: <https://mechanixillustrated.technicacuriosa.com/2017/02/19/a-brief-early-history-of-unmanned-systems/>. [Último acceso: 28 enero 2026].
- [8] Standing Well Back, «Historical ROVs,» [En línea]. Available: <https://www.standingwellback.com/historical-rovs/>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [9] Tank Archives, «The Last of Stalin's Robots,» [En línea]. Available: <https://www.tankarchives.com/2023/05/the-last-of-stalins-robots.html>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [10] Wikipedia contributors, «Teletank,» [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Teletank>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [11] Lonesentry, «British Experiment in Tank Radio Control,» [En línea]. Available: https://www.lonesentry.com/articles/ttt07/tank_radio_control.html. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [12] Tank Archives, «Goliath Demolition Vehicle,» [En línea]. Available: <https://www.tankarchives.com/2023/01/goliath-demolition-vehicle.html>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [13] Wikipedia contributors, «Goliath tracked mine,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Goliath_tracked_mine. [Último acceso: 28 ENERO 2026].

- [14] IEEE Spectrum, «SRI's Pioneering Mobile Robot Shakey Honored as IEEE Milestone,» [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/sri-shakey-robot-honored-as-ieee-milestone>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [15] L. Martin, «Driving Forces: Autonomous Land Vehicles,» [En línea]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/history/alv.html>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [16] iRobot Corporation, «iRobot to Demonstrate Life-Saving Military Robots,» [En línea]. Available: <https://investor.irobot.com/news-releases/news-release-details/media-alert-irobot-demonstrate-life-saving-military-robots>. [Último acceso: 28 ENERO 2026].
- [17] NASA, «All-Terrain Intelligent Robot Braves Battlefield to Save Lives,» [En línea]. Available: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2005/ps_1.html. [Último acceso: 27 ENERO 2026].
- [18] N. Shachtman, «First Armed Robots on Patrol in Iraq,» [En línea]. Available: <https://www.wired.com/2007/08/httpwwwnational/>. [Último acceso: 1 FEBRERO 2026].
- [19] K. Jones, «Special Weapons Observation Remote Recon Direct Action System,» [En línea]. Available: <https://publications.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-AVT-146/MP-AVT-146-36.pdf>. [Último acceso: 1 FEBRERO 2026].
- [20] E. Grynszpan, «Ukrainian forces turn to unmanned ground vehicles to counter drones,» [En línea]. Available: https://www.lemonde.fr/en/international/article/2025/09/01/ukrainian-forces-turn-to-unmanned-ground-vehicles-to-counter-drones_6744929_4.html. [Último acceso: 1 FEBRERO 2026].
- [21] C. P. Johnson, Comparative Analysis of Lightweight Robotic Wheeled and Tracked Vehicles, Master's thesis.
- [22] Ejército de Tierra (España), «Resumen ejecutivo "FUERZA 35",» [En línea]. Available: https://ejercito.defensa.gob.es/estructura/briex_2035/resumen_ejecutivo_fuerza_35.html. [Último acceso: 1 FEBRERO 2026].
- [23] Infodefensa, «Defensa evaluará el UGV Themis de Milrem Robotics,» [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3310526/defensa-evaluara-ugv-themis-milrem-robotics-marco-programa-escorpion>. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].
- [24] Á. L. e Santos, «Así prueba el Ejército su primer UGV,» [En línea]. Available: https://www.larazon.es/tecnologia/asi-prueba-ejercito-espanol-primer-ugv-vehiculo-oruga-tripulado-multitud-funciones_2023022663fbaeb4b3856000016189ff.html. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].
- [25] P. Valpolini, «Valkyrie, an amphibious 6x6 UGV by SASCorp,» [En línea]. Available: <https://www.edrmagazine.eu/valkyrie-an-amphibious-6x6-ugv-by-sascorp>. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].
- [26] Infodefensa, «Sascorp presenta su UGV anfibio Valkyrie,» [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3307097/sascorp-presenta-ugv-anfibio-valkyrie>. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].

- [27] TechUkraine, «Meet TERMIT: The Modular, All-Terrain UGV,» [En línea]. Available: <https://techukraine.org/2025/06/25/meet-termit-the-modular-all-terrain-ugv-greenlit-for-ukraines-armed-forces/>. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].
- [28] defensa.com, «Wild Goose, el novedoso vehículo autónomo terrestre UGV israelí,» [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/industria/wild-goose-novedoso-vehiculo-autonomo-terrestre-ugv-israeli>. [Último acceso: 2 FEBRERO 2026].
- [29] H. Nguyen, N. Pezeshkian, A. Burmeister y A. Hart, «Unmanned Ground Vehicle Communications Relays: Lessons Learned,» SSC Pacific, San Diego, CA, 2014.
- [30] S. Ioannou, K. Dalamagkidis y K. P. Valavanis, «On Improving Endurance of Unmanned Ground Vehicles: The ATRV-Jr Case Study,» de *14th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2006.
- [31] C. L. Tan y M. A. Vonderembse, «Mediating effects of computer-aided design usage: From concurrent engineering to product development performance,» *Journal of Operations Management*, pp. 495-510, 2006.
- [32] ArduPilot, «Rover Failsafes,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/rover/docs/failsafes.html>. [Último acceso: 3 FEBRERO 2026].
- [33] PX4 Project, «Pixhawk Series | PX4 Guide,» [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk_series. [Último acceso: 3 FEBRERO 2026].
- [34] CubePilot, «User Guides,» [En línea]. Available: <https://docs.cubepilot.org/user-guides>. [Último acceso: 3 FEBRERO 2026].
- [35] ArduPilot, «Motor and Servo Configuration — Rover documentation,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/rover/docs/rover-motor-and-servo-configuration.html>. [Último acceso: 3 FEBRERO 2026].
- [36] M.-C. Leu, H. A. ElMaraghy y A. Y. C. Nee, «CAD model based virtual assembly simulation, planning and training,» *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, pp. 799-822, 2013.
- [37] C. Iancu, D. Iancu y A. Stăncioiu, «From CAD Model to 3D Print via “STL” File Format,» *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*, pp. 73-80.
- [38] «Yahboom,» [En línea]. Available: https://category.yahboom.net/es?srsltid=AfmBOoqENuwm6hIVRVIGqbGw04iv_3ZwTLlRQptjG-YoWjwRKLD3LHYF. [Último acceso: 16 Marzo 2026].
- [39] «GrabCad community,» [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library>. [Último acceso: 15 Febrero 2026].
- [40] B. Creations, «Youtube,» [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=_v1_undSqkU. [Último acceso: 20 Febrero 2026].
- [41] «ArduPilot,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/rover/docs/common-loading-firmware-onto-pixhawk.html>. [Último acceso: 04 MARZO 2026].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente Trabajo de Fin de Grado contribuye positivamente al desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas al ámbito de los sistemas terrestres no tripulados. El diseño, integración y puesta en funcionamiento de un UGV basado en una plataforma física real, dotada de nueva electrónica de control, radiocontrol avanzado y arquitectura abierta de autopiloto, supone una aportación relevante tanto en el campo de la formación técnica como en el de la experimentación aplicada. Este tipo de desarrollos favorece la adquisición de competencias en áreas como la robótica móvil, la automatización, las comunicaciones, la integración de sensores y el control remoto, promoviendo un aprendizaje práctico, interdisciplinar y alineado con las necesidades tecnológicas actuales.

Desde el punto de vista social, el proyecto presenta un impacto positivo al acercar tecnologías complejas a entornos de formación e investigación, facilitando que estudiantes y futuros operadores comprendan de manera aplicada el funcionamiento de una plataforma no tripulada terrestre. Además, el empleo de un UGV permite ensayar conceptos de movilidad, teleoperación y supervisión remota sin exponer directamente al personal a entornos potencialmente peligrosos. En este sentido, este tipo de vehículos puede tener proyección no solo en el ámbito militar, sino también en aplicaciones civiles relacionadas con inspección técnica, vigilancia de infraestructuras, apoyo en emergencias o reconocimiento de zonas de difícil acceso, lo que amplía su utilidad social y tecnológica.

Asimismo, el desarrollo del sistema ha implicado la reutilización y mejora de una plataforma previa, sustituyendo el sistema de radiocontrol original por una arquitectura más robusta, configurable y escalable. Esta transición no solo incrementa las capacidades del vehículo, sino que también demuestra el valor de la modernización tecnológica de medios existentes frente a su sustitución completa. De este modo, el proyecto fomenta una cultura de innovación basada en la adaptación, la mejora continua y el aprovechamiento de recursos, aspectos especialmente relevantes en contextos donde la eficiencia y la funcionalidad son prioritarias.

Desde una perspectiva económica, el trabajo pone de manifiesto que es posible desarrollar un prototipo funcional de UGV mediante el uso de componentes comerciales relativamente accesibles, software de código abierto y soluciones modulares de integración. El empleo de Pixhawk, ArduRover y sistemas compatibles permite reducir considerablemente los costes de desarrollo frente a otras plataformas propietarias o industriales de mayor complejidad. A ello se suma la posibilidad de realizar pruebas, ajustes y validaciones de manera progresiva, evitando inversiones elevadas en fases tempranas y facilitando la detección de errores antes de escalar el sistema.

Además, la arquitectura modular implementada favorece el mantenimiento, la sustitución de componentes y la futura ampliación de capacidades, como la incorporación de nuevas cámaras, sensores, sistemas de transmisión o funciones semiautónomas. Esta escalabilidad incrementa el retorno de la inversión inicial, ya que el vehículo no queda limitado a una única configuración cerrada, sino que puede evolucionar en función de nuevas necesidades operativas, docentes o experimentales. En consecuencia, el proyecto representa una solución económicamente eficiente para el estudio y validación de tecnologías asociadas a vehículos terrestres no tripulados.

En el plano ambiental, el impacto del proyecto puede considerarse moderadamente positivo, especialmente por el enfoque de reutilización, integración y optimización de recursos ya existentes. La adaptación de una plataforma previa evita, en parte, la necesidad de fabricar un sistema completamente nuevo, reduciendo el consumo de materiales y el volumen de residuos asociados. Del mismo modo, el uso de componentes electrónicos modulares facilita reparaciones puntuales y sustituciones selectivas, alargando la vida útil del conjunto y disminuyendo la generación innecesaria de desechos tecnológicos.

Por otro lado, al tratarse de un vehículo terrestre eléctrico y de dimensiones reducidas, su empleo en actividades de ensayo, formación e investigación presenta un impacto ambiental más reducido que el de otros medios motorizados de mayor tamaño. Asimismo, muchas de las tareas de configuración y comprobación del sistema pueden realizarse de forma previa o en entornos controlados, evitando un uso innecesario del vehículo y reduciendo tanto el consumo energético como el desgaste de sus componentes. De este modo, el proyecto se enmarca en una línea de desarrollo tecnológico más responsable, apoyada en la reutilización de recursos, la optimización de materiales y la mejora progresiva de la plataforma.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de tecnologías aplicadas a vehículos terrestres no tripulados, como el sistema UGV, plantea diversas reflexiones en el plano ético y social, especialmente por su carácter de tecnología de doble uso. Este tipo de plataformas puede tener aplicaciones en ámbitos civiles, como la inspección de infraestructuras, la exploración de zonas peligrosas, el apoyo en emergencias o la vigilancia técnica de espacios de difícil acceso. Sin embargo, en un contexto militar, estas mismas capacidades pueden orientarse a tareas de reconocimiento, apoyo o intervención en entornos de riesgo. Esta doble vertiente exige una reflexión responsable sobre los fines de uso, las condiciones de empleo y los límites que deben establecerse en su desarrollo y aplicación.

Desde una perspectiva ética, uno de los principales aspectos a considerar es que la incorporación de sistemas no tripulados en el ámbito terrestre no debe suponer una desvinculación de la responsabilidad humana en la toma de decisiones. Aunque estos vehículos pueden reducir la exposición directa del personal en escenarios potencialmente peligrosos, su utilización debe mantenerse siempre bajo supervisión, control y criterio humano, especialmente cuando operan en entornos sensibles o con posible presencia de población civil. La mejora tecnológica no elimina la necesidad de evaluar las consecuencias de su empleo, por lo que el diseño y utilización de este tipo de sistemas debe orientarse hacia la seguridad, la proporcionalidad y la prevención de usos inadecuados.

Asimismo, el proyecto desarrollado presenta una dimensión social positiva, en la medida en que contribuye a la formación técnica y al conocimiento aplicado en áreas como la robótica móvil, la automatización y el control remoto. La construcción e integración de una plataforma UGV permite comprender de forma práctica cómo estas tecnologías pueden utilizarse para aumentar la seguridad del personal, facilitar tareas de reconocimiento o acceder a espacios donde la intervención humana directa entrañaría mayores riesgos. En este sentido, los sistemas terrestres no tripulados pueden considerarse herramientas con potencial para mejorar tanto la eficacia operativa como la protección de las personas, siempre que su uso se mantenga dentro de marcos normativos y éticos claramente definidos.

Desde el punto de vista legal y de la responsabilidad tecnológica, resulta fundamental que el empleo de sistemas de este tipo se ajuste en todo momento a la normativa aplicable y, en el ámbito militar, a los principios del Derecho Internacional Humanitario cuando proceda. En particular, deben tenerse presentes principios como la distinción, la proporcionalidad y la necesidad, que obligan a diferenciar adecuadamente entre objetivos legítimos y no legítimos, a limitar la acción a lo estrictamente necesario y a evitar efectos indebidos o desproporcionados.

Por último, también debe considerarse el valor ético de este tipo de proyectos en el ámbito de la investigación y la formación, ya que permiten ensayar soluciones tecnológicas, validar configuraciones y adquirir experiencia técnica en entornos controlados, reduciendo riesgos innecesarios para las personas y favoreciendo un uso más seguro y racional de los recursos materiales.

ANEXO III: USO DE IA

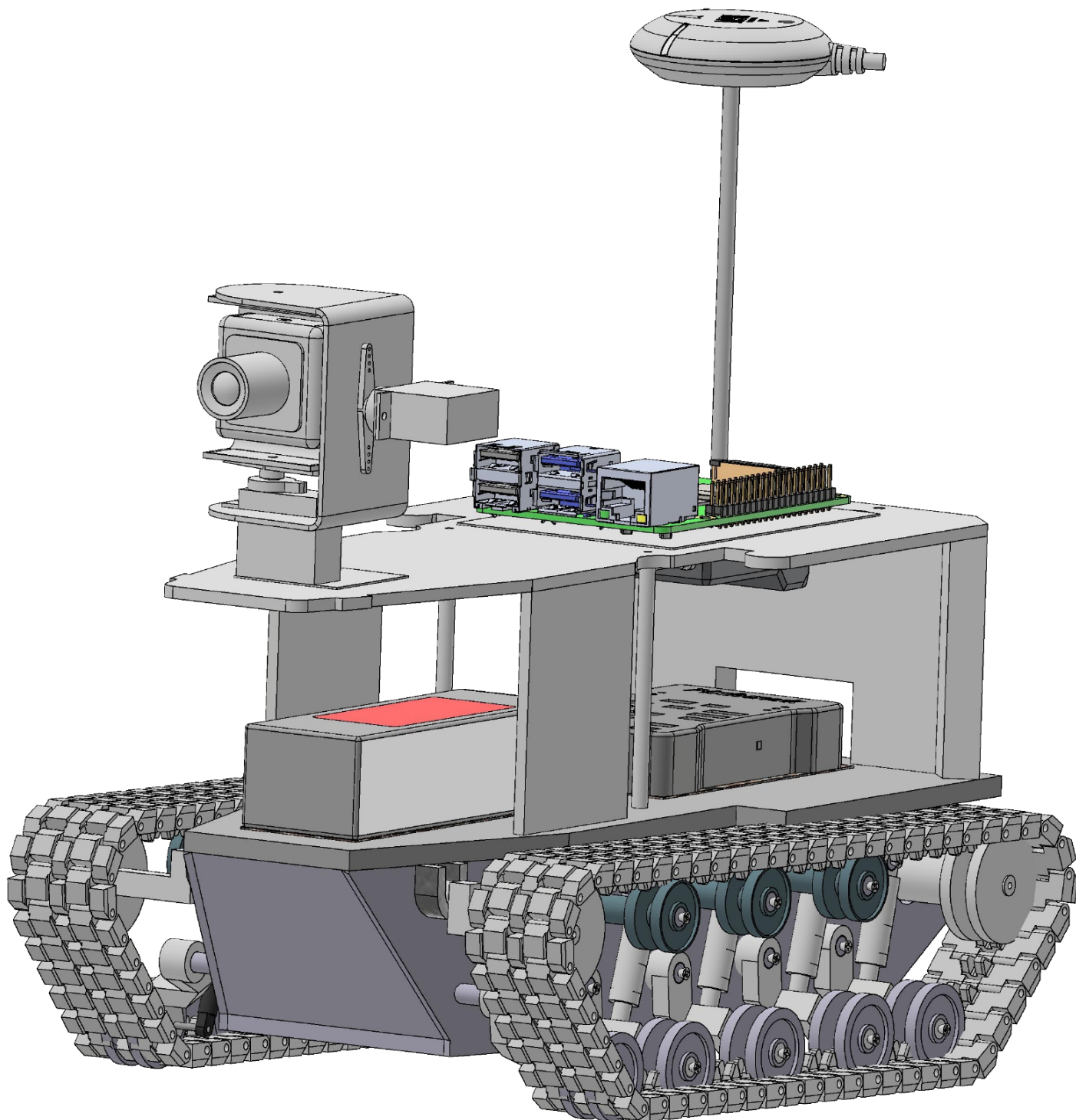
Durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado se ha utilizado ChatGPT como una herramienta de apoyo puntual en distintas fases del proceso. Su uso ha tenido en todo momento un carácter complementario, y no sustitutivo, es decir, no se ha empleado para desarrollar íntegramente el trabajo, sino como ayuda en tareas concretas que podían agilizar la elaboración de la memoria. La definición del tema, el planteamiento del proyecto, el desarrollo técnico, el modelado, la integración física del sistema, la configuración de los distintos subsistemas, la realización de pruebas, la interpretación de resultados y la redacción final del contenido han sido asumidos de forma directa y personal.

Uno de los usos principales ha sido el apoyo en la búsqueda inicial de bibliografía relacionada con el tema del trabajo. En este sentido, la herramienta ha resultado útil para orientar la búsqueda y localizar de forma más rápida posibles fuentes de interés. No obstante, la revisión de esa bibliografía, la comprobación de su validez y la selección final de las referencias empleadas en la memoria se han realizado de forma personal y bajo criterio propio.

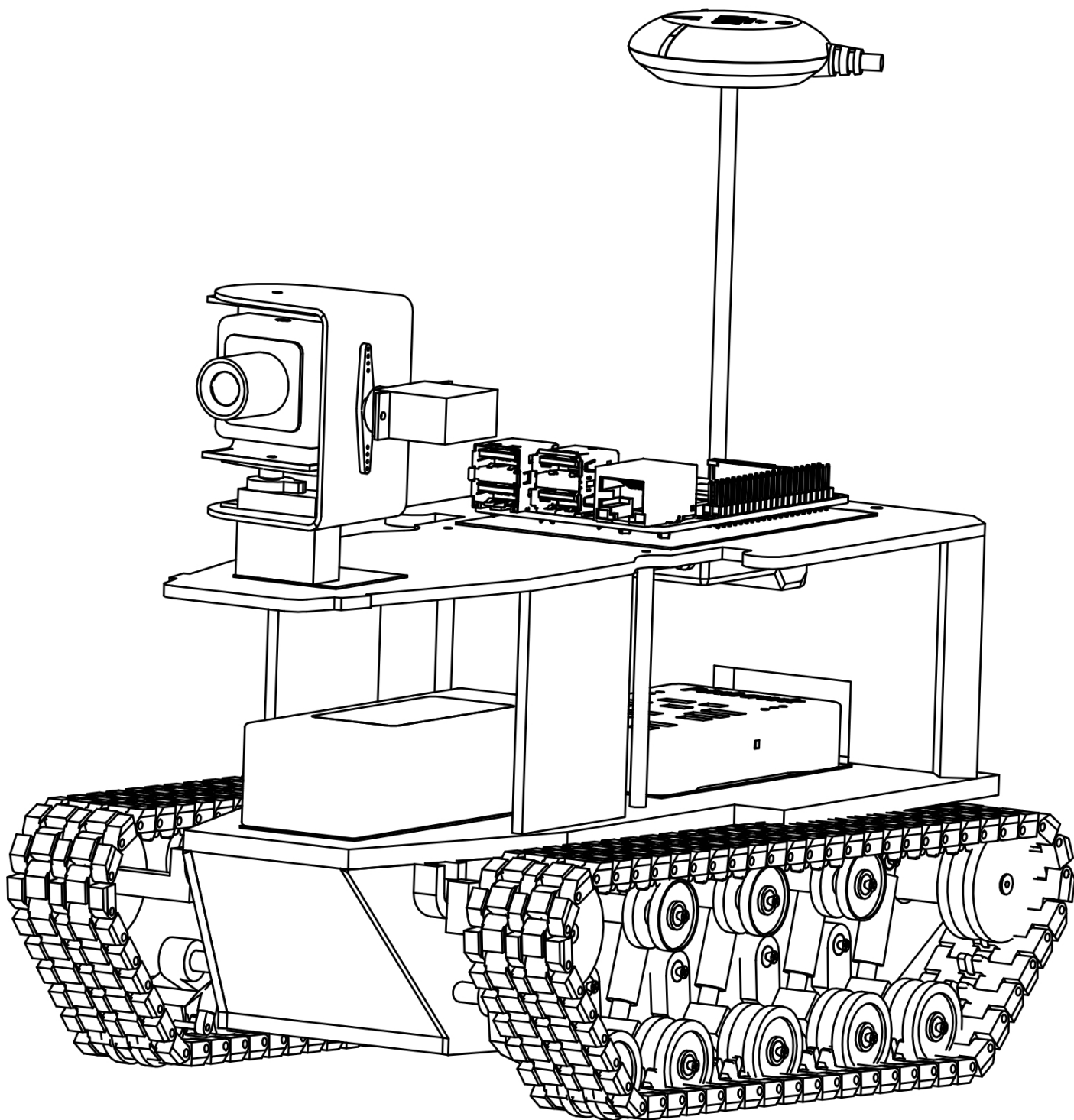
También se ha utilizado como apoyo en la reformulación de algunos fragmentos del texto, con el objetivo de darles una redacción más formal, clara y adecuada al estilo de una memoria académica. En estos casos, la herramienta no se ha empleado para generar el contenido del trabajo, sino para ayudar a mejorar la forma de expresar ideas, procesos o resultados que ya habían sido desarrollados previamente.

Por último, ChatGPT también se ha utilizado en la creación de imágenes de apoyo para la memoria, con una finalidad principalmente ilustrativa y complementaria.

ANEXO IV: PLANIMETRÍA

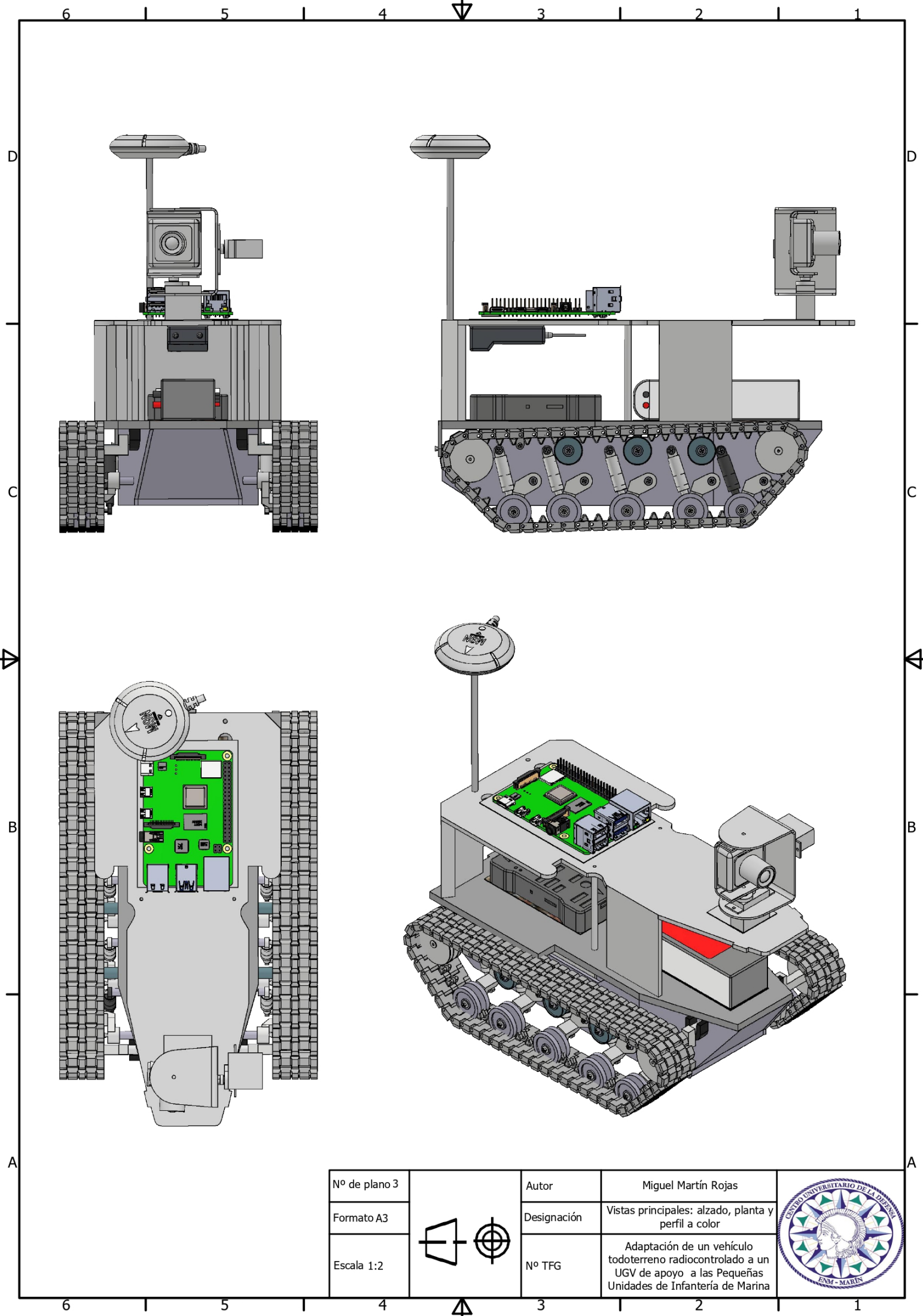


Nº de plano 1		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Vista isométrica del ensamblaje completo a color	
Escala 1:1		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	



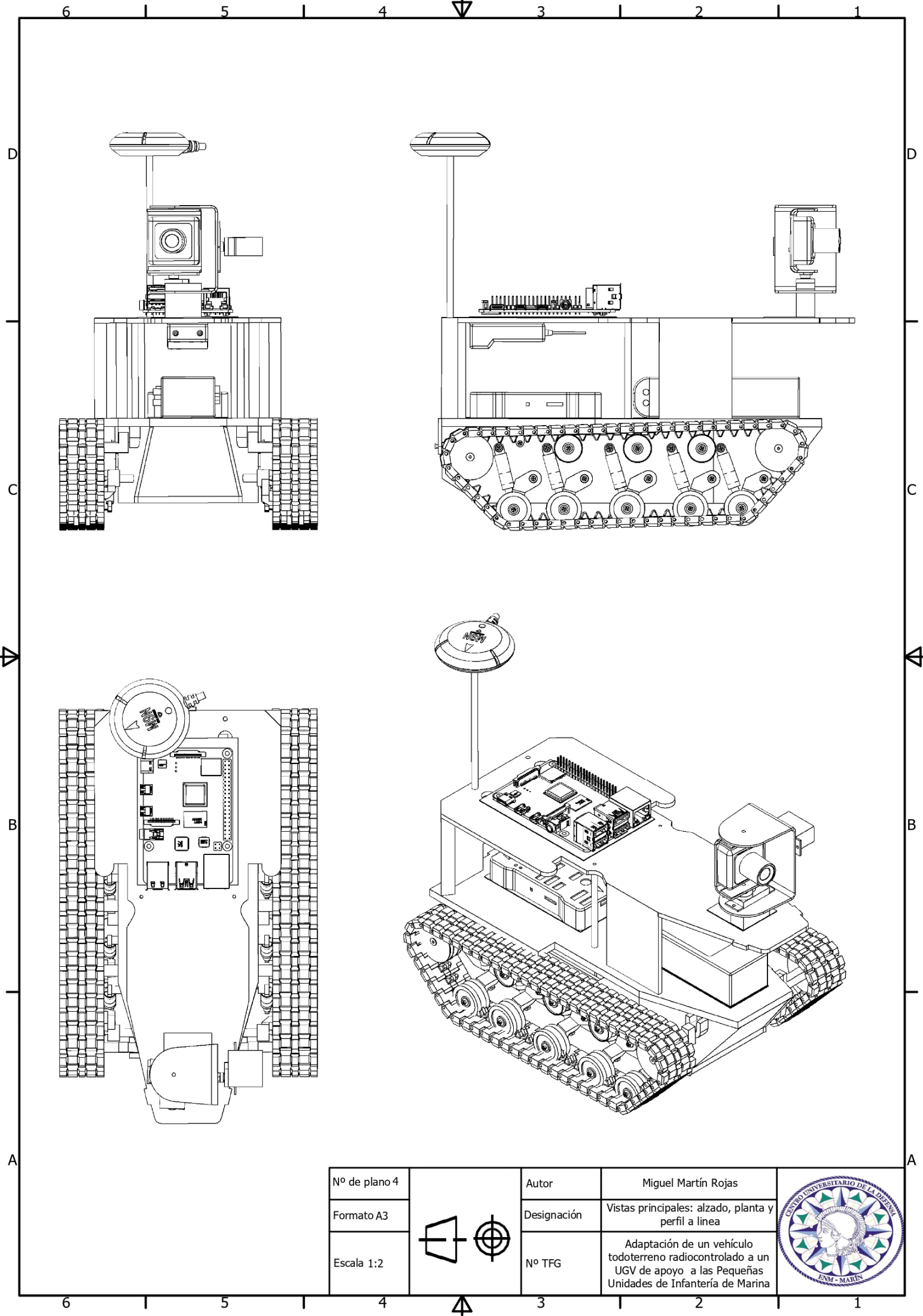
Nº de plano 2		Autor	Miguel Martín Rojas
Formato A3		Designación	Vista isométrica del ensamblaje completo a línea
Escala 1:1		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina





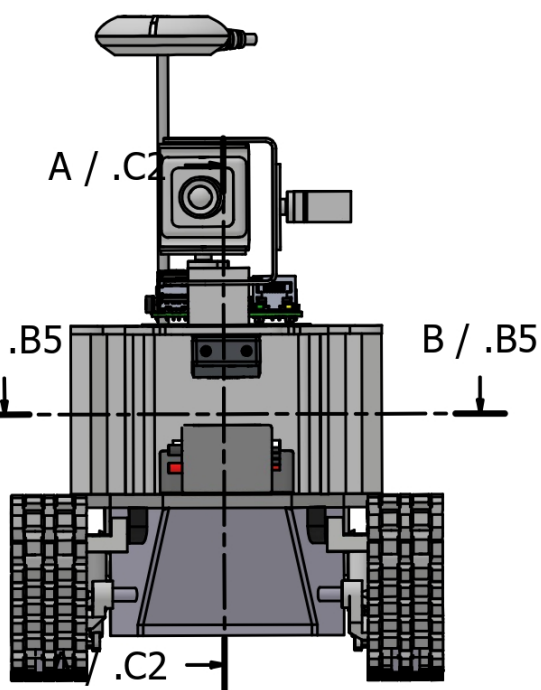
Nº de plano 3		Autor	Miguel Martín Rojas
Formato A3		Designación	Vistas principales: alzado, planta y perfil a color
Escala 1:2		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina



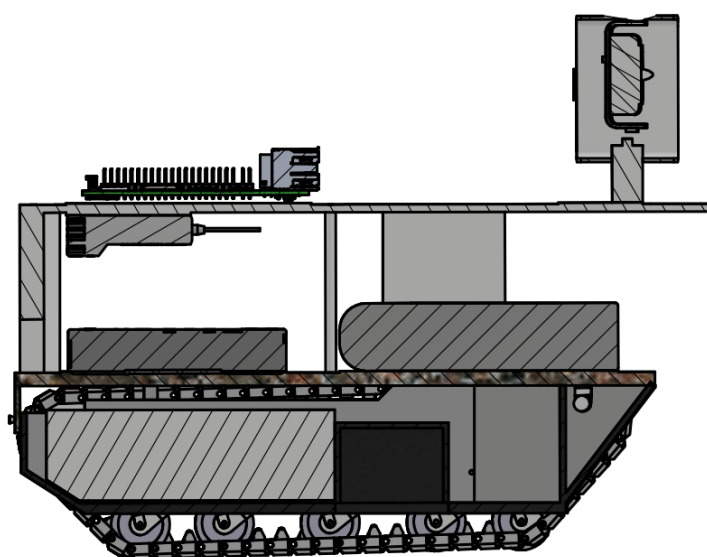


Nº de plano 4		Autor	Miguel Martín Rojas
Formato A3		Designación	Vistas principales: alzado, planta y perfil a línea
Escala 1:2		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina

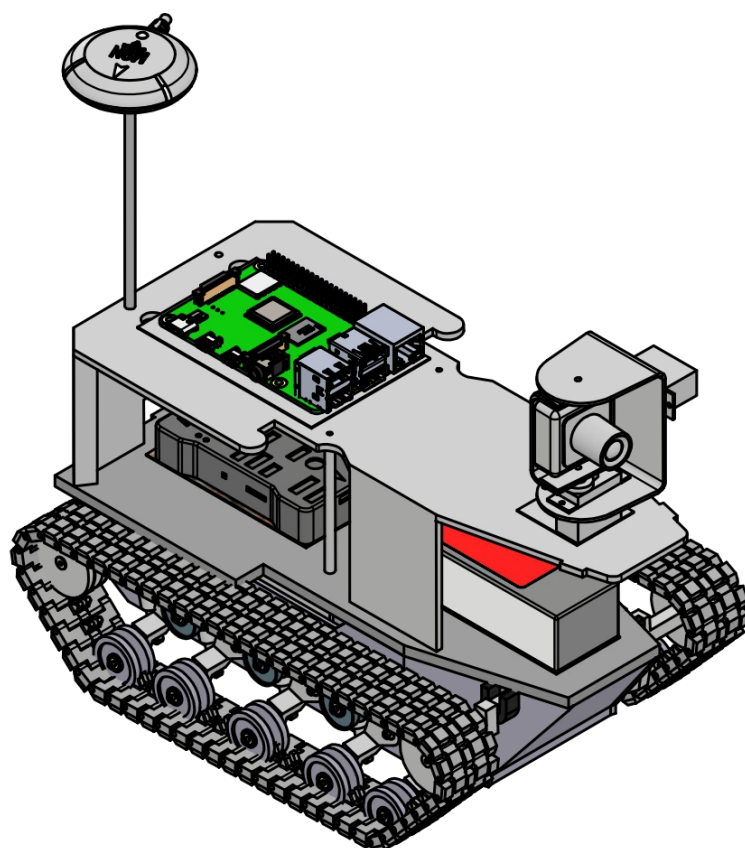
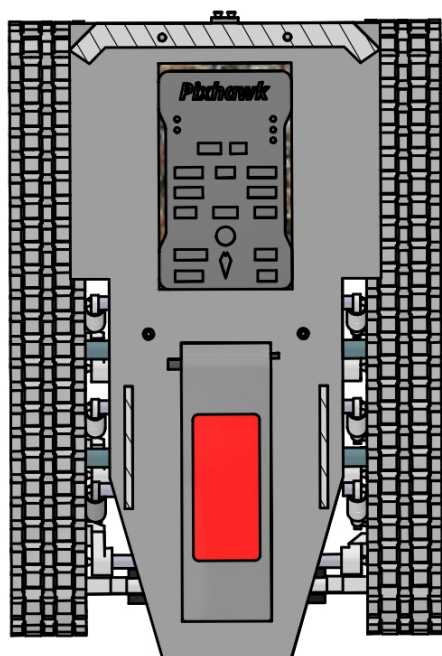




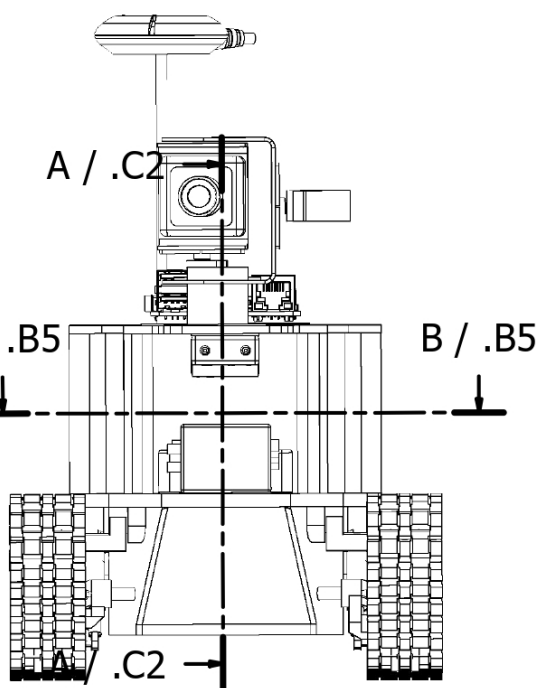
A-A (1 : 2) / .C5



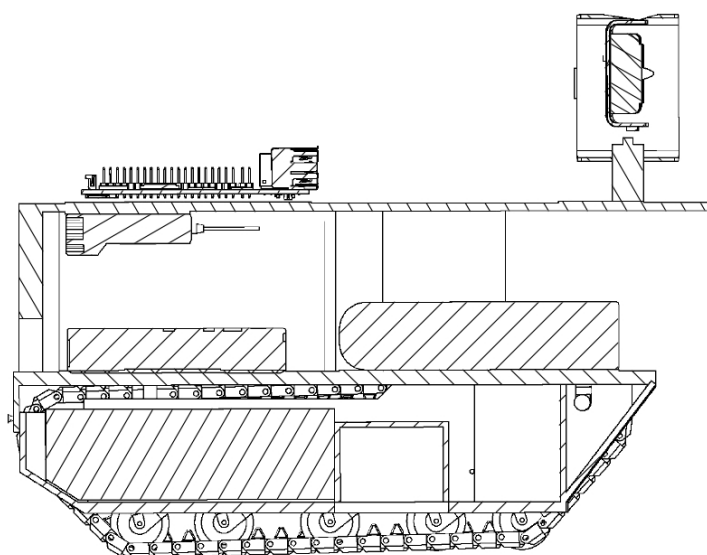
B-B (1 : 2) / .C5



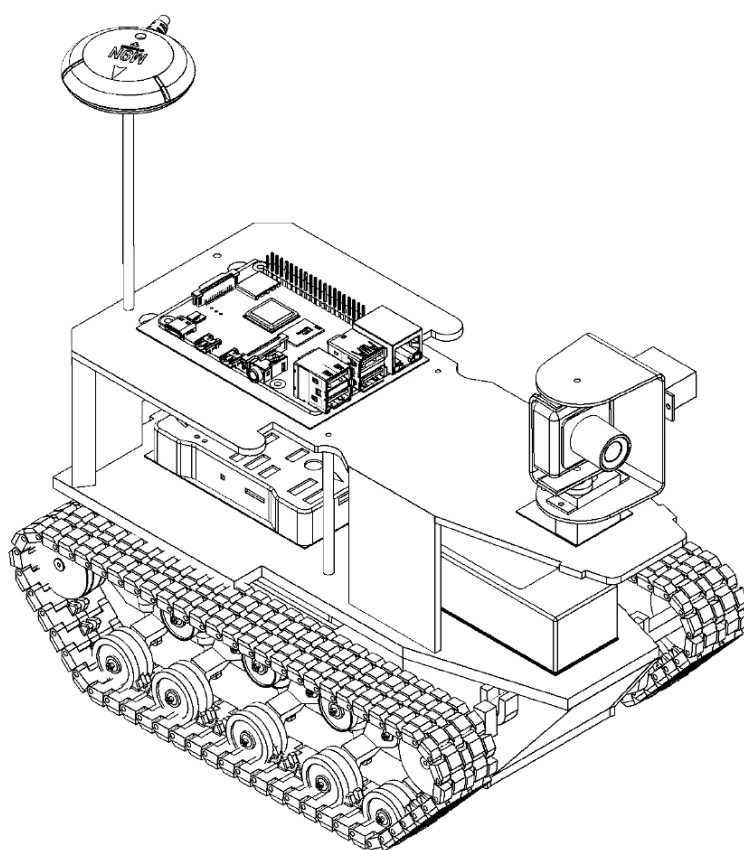
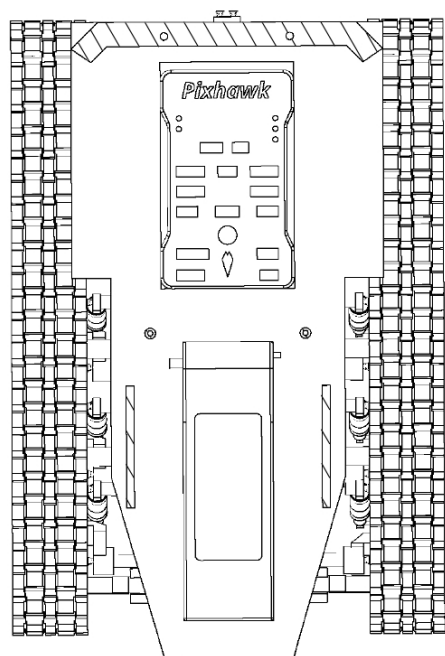
Nº de plano 5		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Sección del ensamblaje completo	
Escala 1:2		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	



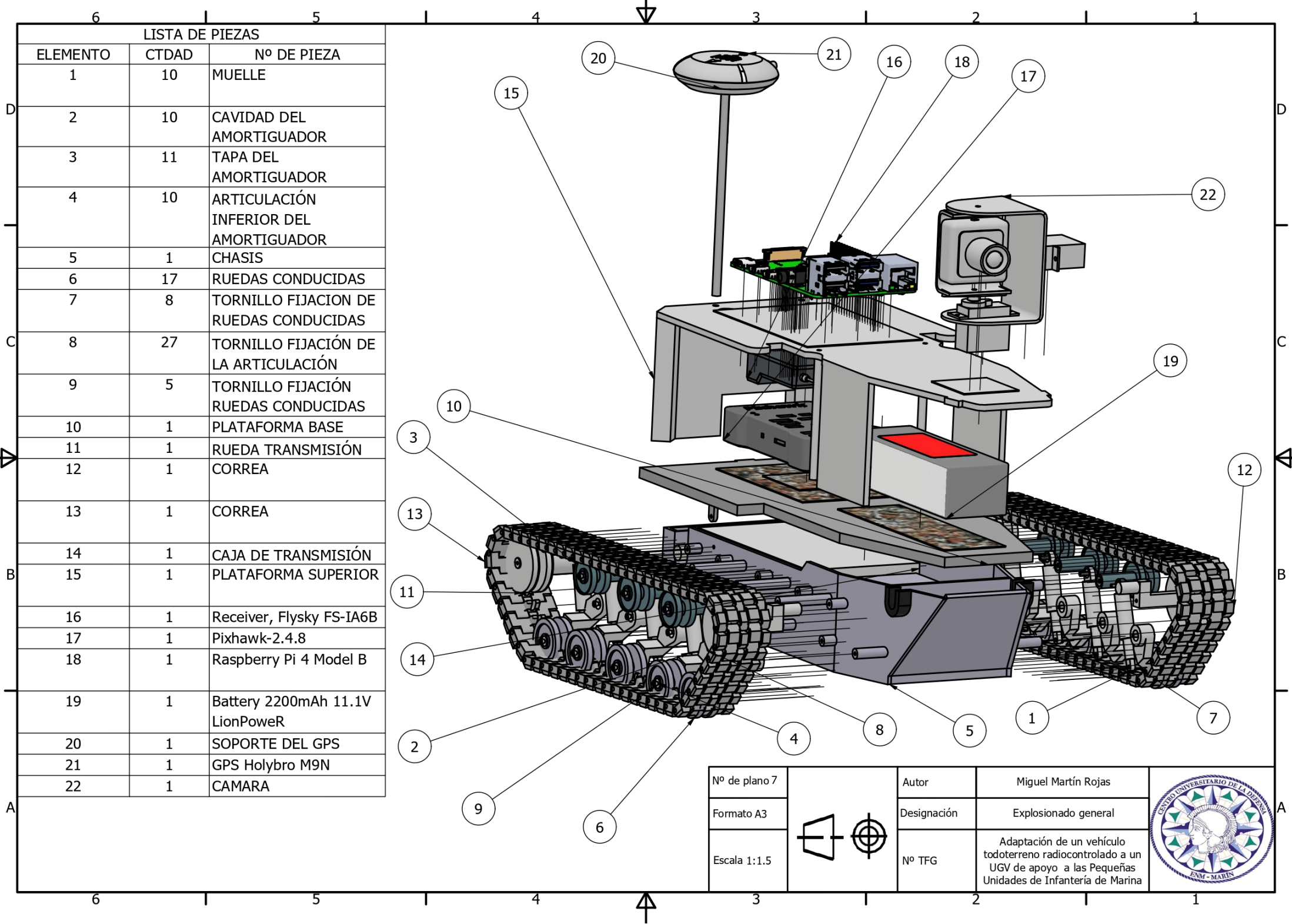
A-A (1 : 2) / .C5

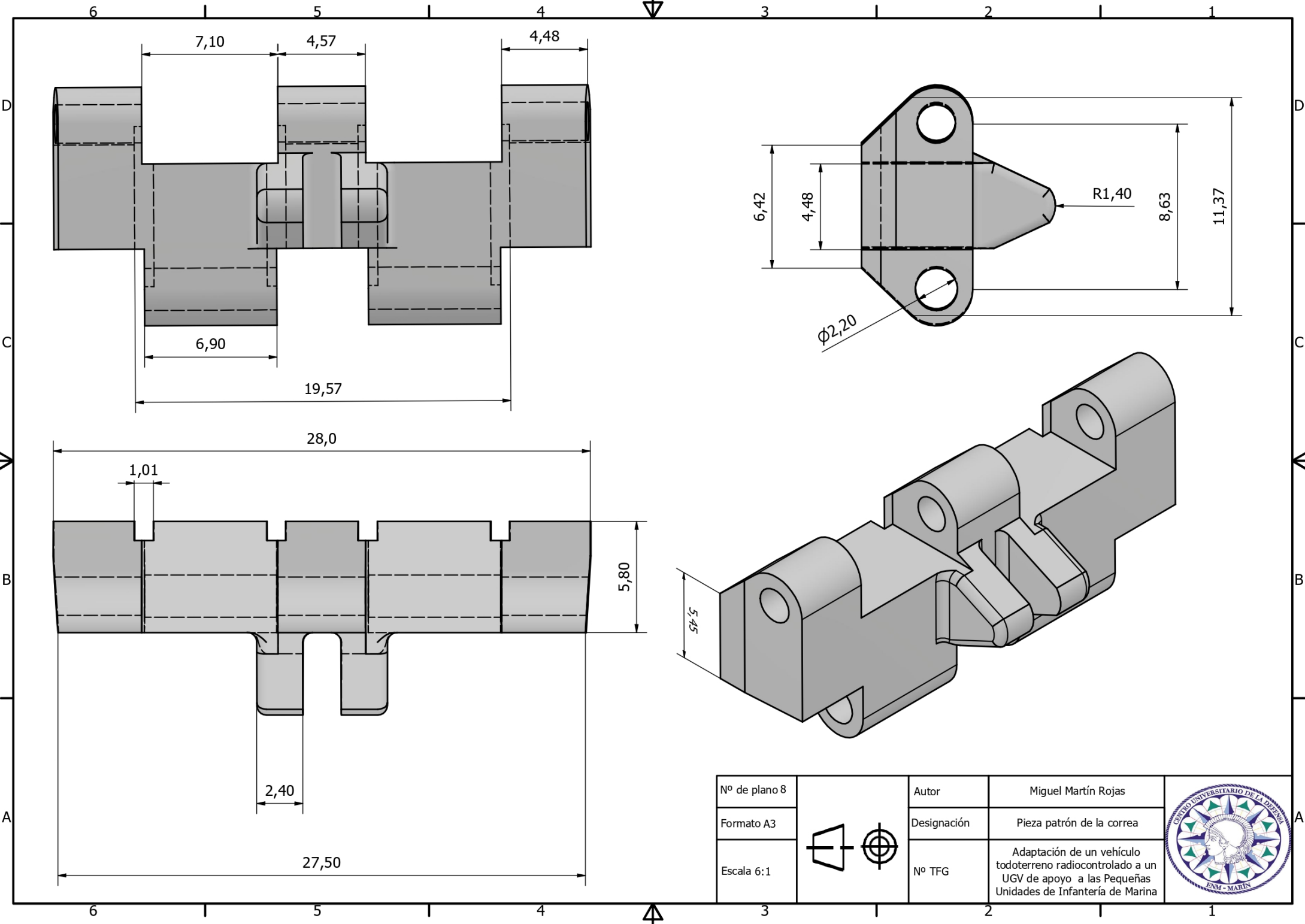


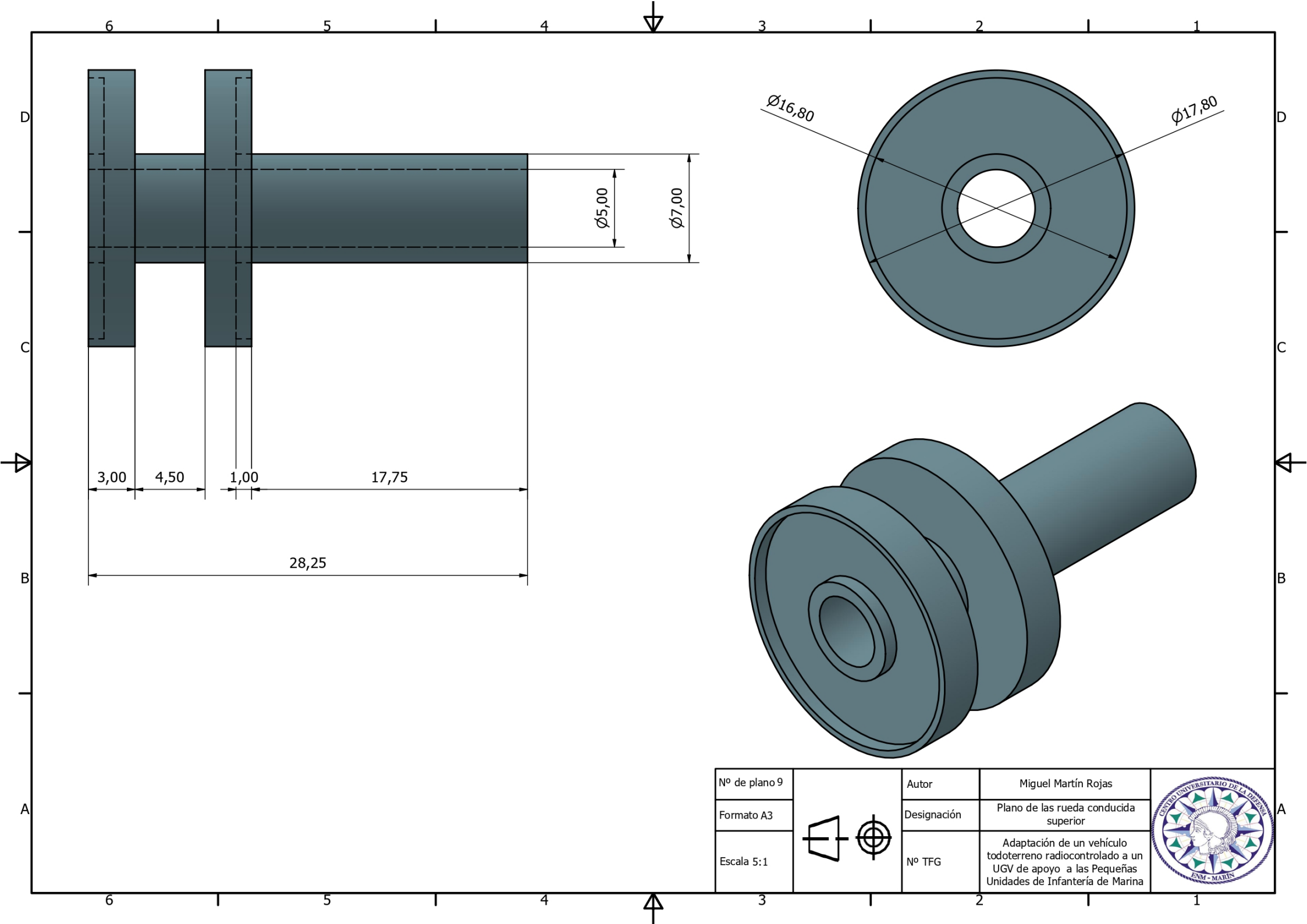
B-B (1 : 2) / .C5

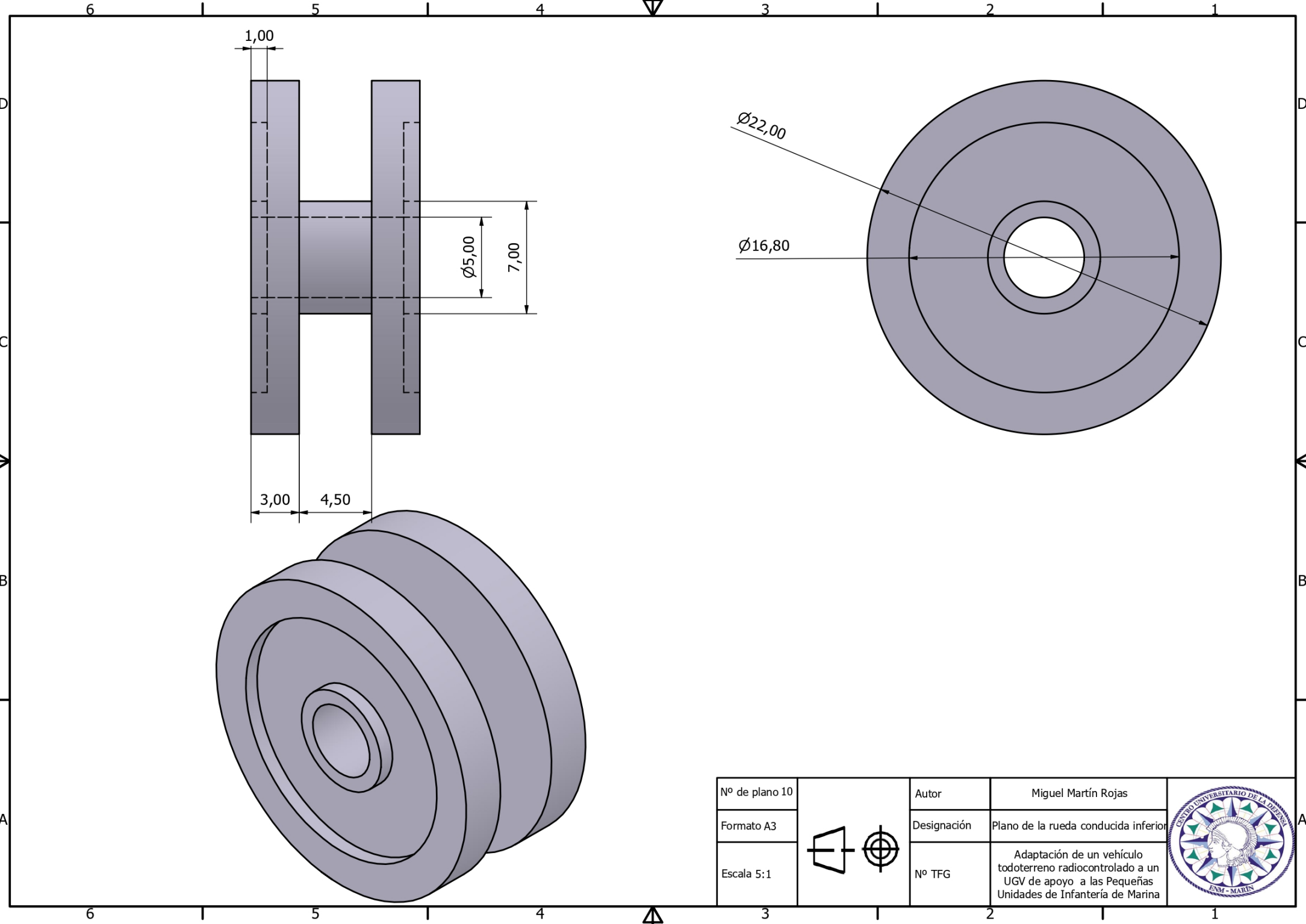


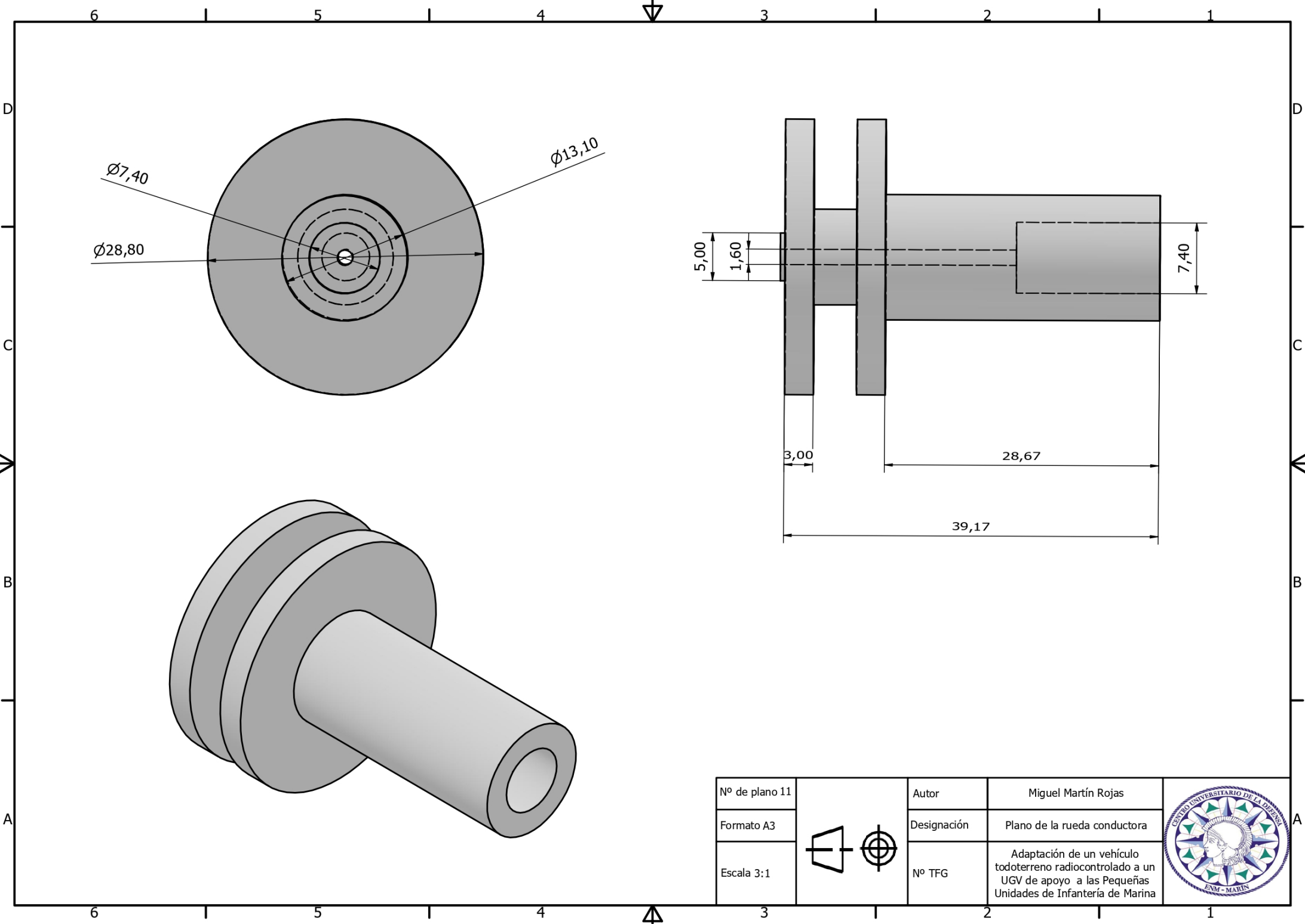
Nº de plano 6		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Sección del ensamblaje completo línea	
Escala 1:2		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	

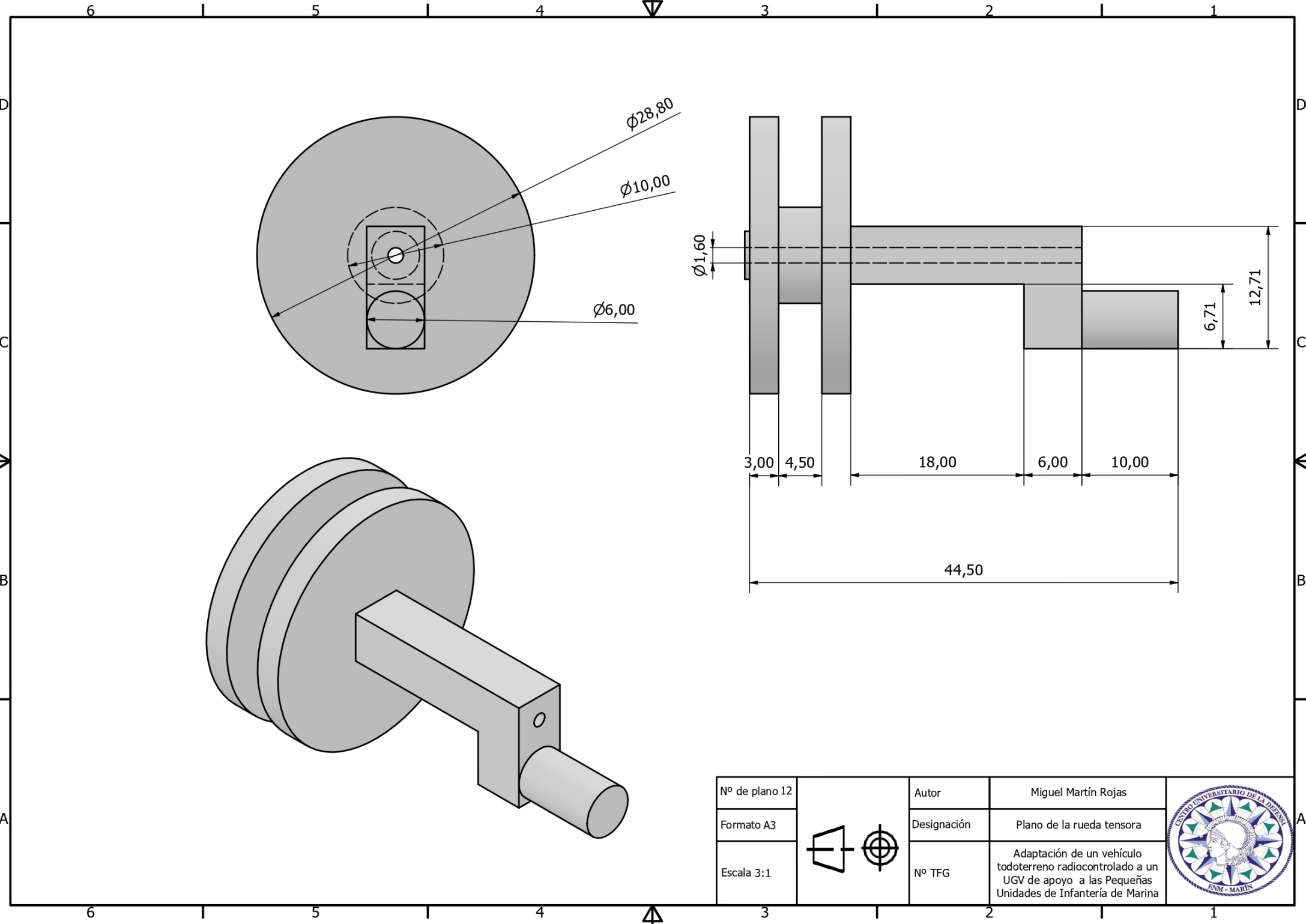




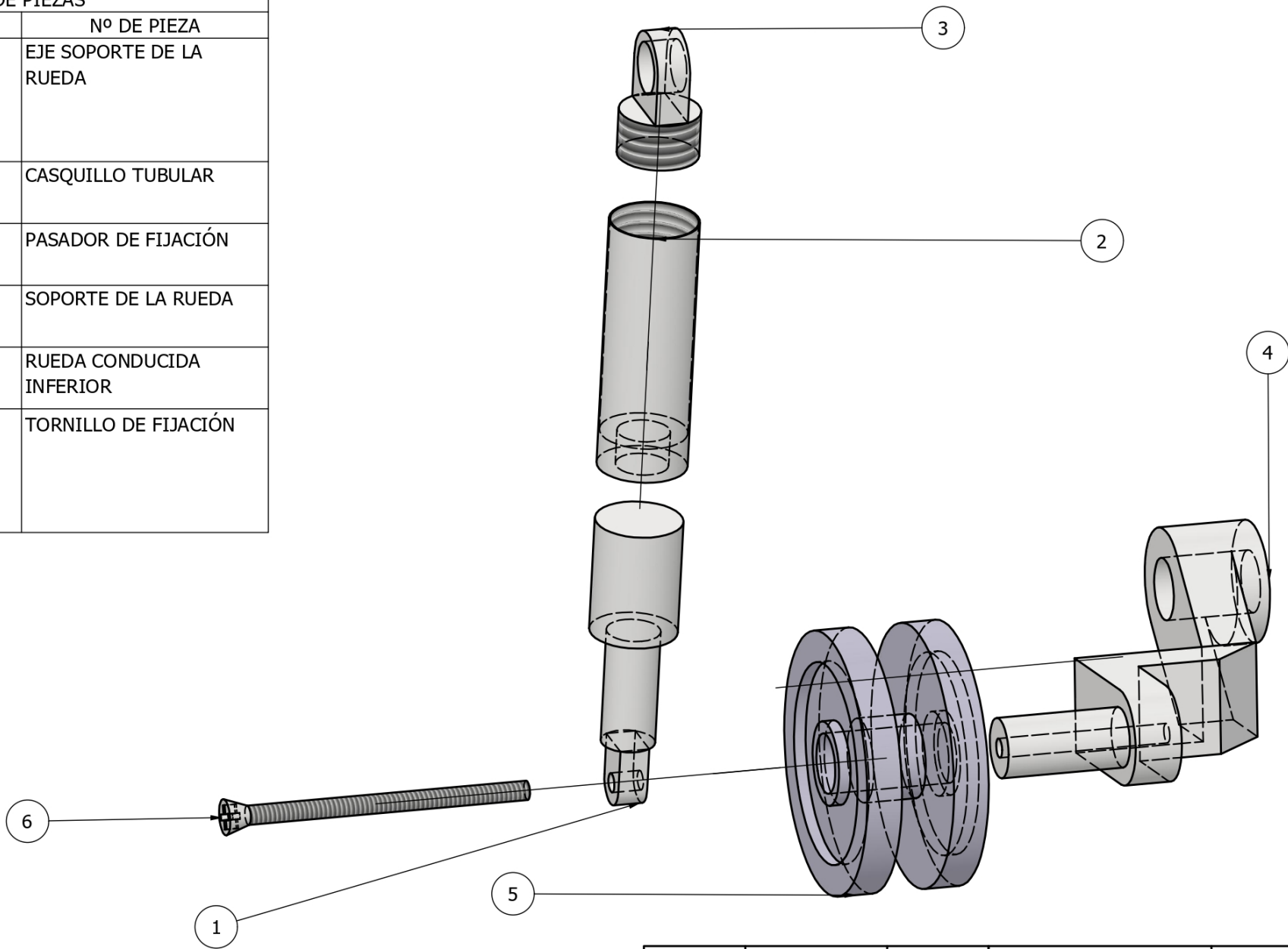






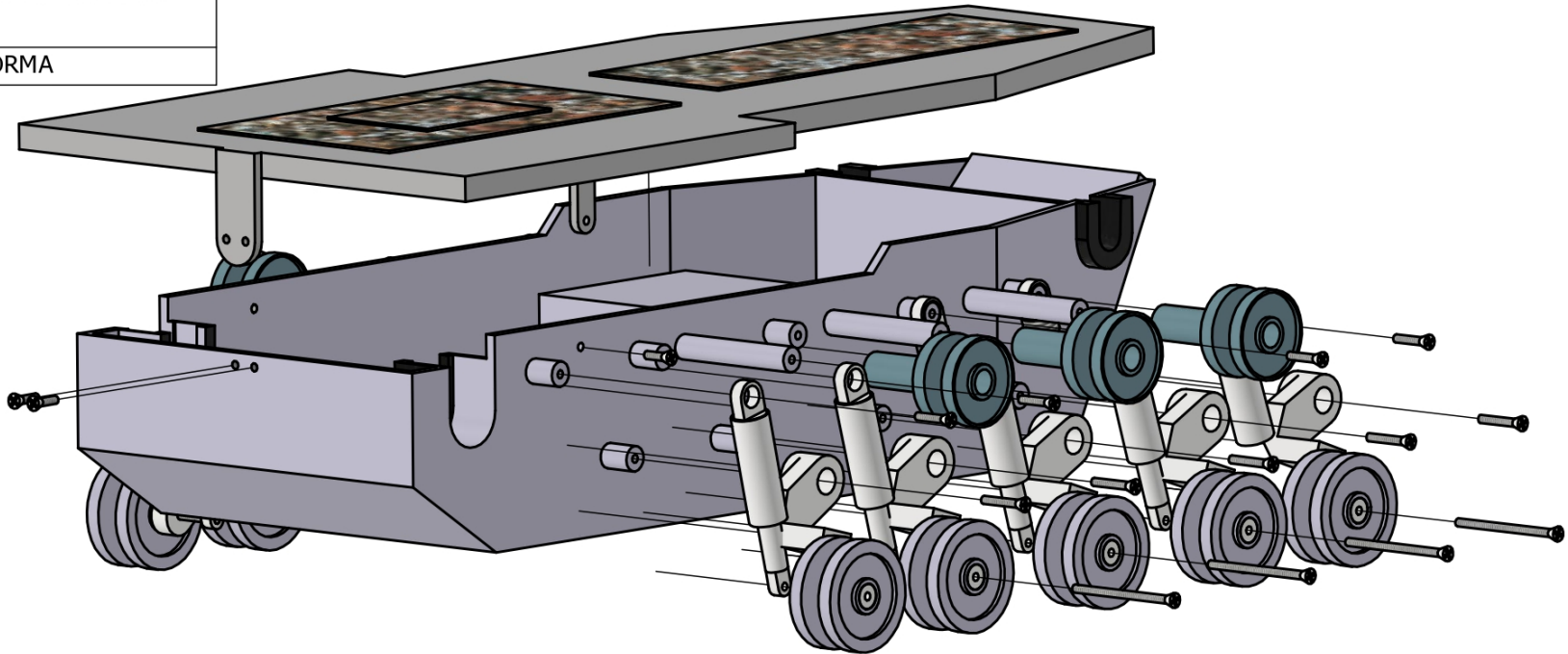


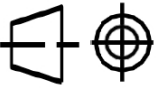
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	EJE SOPORTE DE LA RUEDA
2	1	CASQUILLO TUBULAR
3	1	PASADOR DE FIJACIÓN
4	1	SOPORTE DE LA RUEDA
5	1	RUEDA CONDUCTIDA INFERIOR
6	1	TORNILLO DE FIJACIÓN



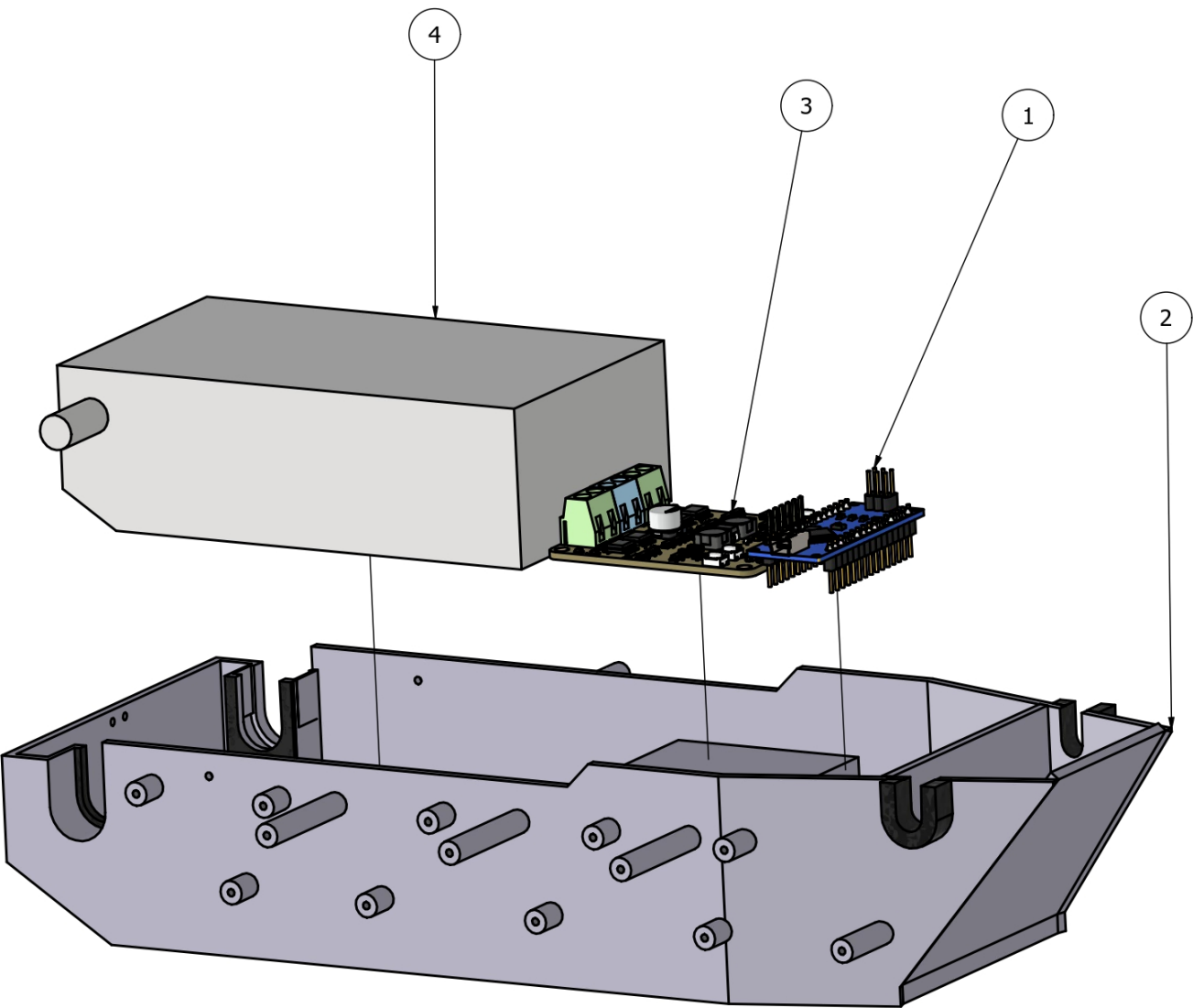
Nº de plano 13		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Despiece conjunto amortiguación + rueda inferiorción	
Escala 3:1		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	10	SOPORTE DE LA RUEDA
2	1	ESTRUCTURA
3	9	EJE SOPORTE DE LA RUEDA
4	10	CASQUILLO TUBULAR
5	10	PASADOR DE FIJACIÓN
6	14	RUEDA INFERIOR
7	22	TORNILLO DE FIJACIÓN
8	5	TORNILLO DE FIJACIÓN
9	4	TORNILLO DE FIJACIÓN
10	1	PLATAFORMA



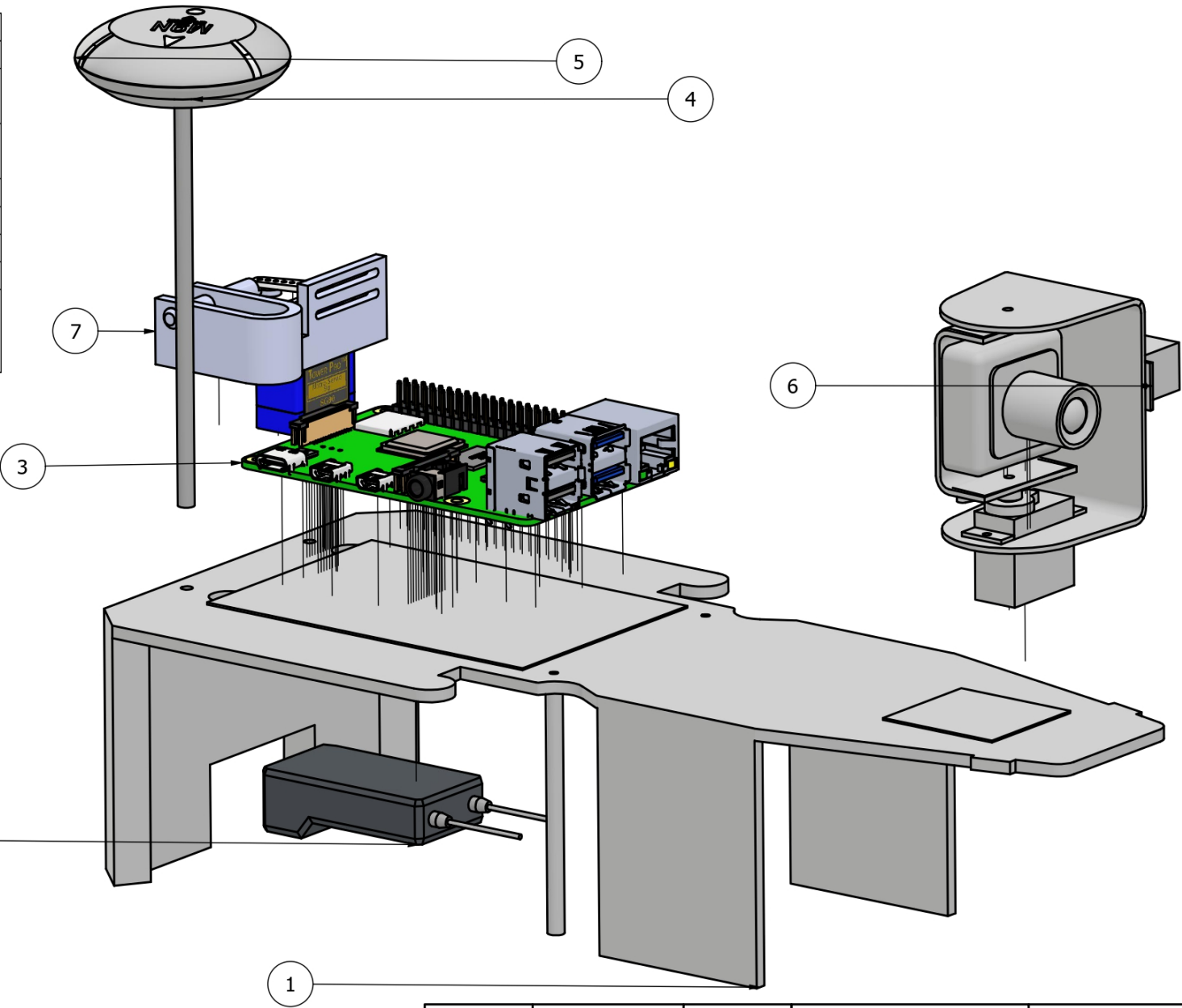
Nº de plano 14		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Explosionado del conjunto interior (chasis + soportes + plataformas)	
Escala 1:1.5		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	ARDUINO NANO
2	1	ESTRUCTURA
3	1	MDD3A
4	1	CAJA DE TRANSMISIÓN



Nº de plano 15		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Explosionado del chasis con sus elementos internos	
Escala 1:1		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	ESTRUCTURA PARTE SUPERIOR
2	1	RECEPTOR Flysky FS-IA6B
3	1	Raspberry Pi 4 Model B
4	1	SOPORTE GPS
5	1	GPS Holybro M9N
6	1	CAMARA
7	1	SERVO CON MECANISMO DE LIBERACIÓN



Nº de plano 16		Autor	Miguel Martín Rojas	
Formato A3		Designación	Explosionado de la estructura superior	
Escala 1:1		Nº TFG	Adaptación de un vehículo todoterreno radiocontrolado a un UGV de apoyo a las Pequeñas Unidades de Infantería de Marina	