



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones:
disposición general de sistemas y balance energético*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando López Gómez-Millán

DIRECTORES: Pedro Carrasco Pena

Ana Ogando Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones:
disposición general de sistemas y balance energético*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado desarrolla el diseño de una plataforma naval autónoma destinada a la recarga de drones aéreos. La principal motivación del proyecto radica en la necesidad de extender la autonomía operativa de estos vehículos, abordando una de sus mayores limitaciones: el suministro energético. La plataforma, basada en un diseño de catamarán, optimiza estabilidad, y cuenta con un sistema de generación y almacenamiento de energía mediante paneles solares y baterías de fosfato de hierro y litio.

El sistema de recarga implementado utiliza estaciones de intercambio de baterías, lo que permite minimizar el tiempo de inactividad de los drones y mejorar su operatividad en misiones de vigilancia, reconocimiento y operaciones anfibia. Se han llevado a cabo estudios de estabilidad, balance energético y consumo eléctrico, validando la viabilidad del diseño. Asimismo, se han analizado distintos métodos de propulsión y autonomía, garantizando un funcionamiento sostenible incluso en entornos marítimos adversos.

Este proyecto representa una solución innovadora para mejorar la operatividad de drones en misiones estratégicas, facilitando operaciones prolongadas sin intervención humana.

PALABRAS CLAVE

Plataforma naval, Recarga de drones, Energía renovable, Autonomía operativa, Catamarán autónomo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer este proyecto a todas aquellas personas que me han ayudado durante su desarrollo. En especial, a mis tutores, la Profesora Ana Ogando y el TN Carrasco Pena, por su constante seguimiento y disponibilidad a lo largo del proceso.

También quiero expresar mi gratitud al CEVENTA, en particular al CN Rosano Jiménez y al TN Verdi, por su apoyo y las consultas realizadas.

A mi compañero, el AF Viniegra de la Fuente, por su valiosa ayuda con la aplicación Autodesk CFD.

Quiero agradecer igualmente al equipo de Hextronics, en especial a Tighernán Shaffrey, por la reunión mantenida y su disposición para este proyecto.

Por último, quiero agradecer a mis padres la educación que me han brindado y su apoyo incondicional durante todo este proyecto.

CONTENIDO

Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
Diccionario de siglas, acrónimos y abreviaturas	6
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Motivación	8
1.2 Contexto	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Metodología	10
1.5 Estructura de la memoria	10
2 Estado del arte	12
2.1 Evolución histórica y tecnológica	12
2.1.1 Orígenes de los drones.....	12
2.1.2 Desarrollo histórico de las plataformas autónomas navales	14
2.2 Clasificación de vehículos autónomos	15
2.2.1 Vehículos aéreos no tripulados (UAV): características y aplicaciones	15
2.2.2 Vehículos de superficie no tripulados (USV): características y aplicaciones	16
2.2.3 Vehículos submarinos no tripulados (UUV): características y aplicaciones.....	18
2.3 Interacción entre drones y plataformas autónomas.....	19
2.3.1 Estaciones de recarga para UAV: perspectiva actual	19
2.4 Energías renovables y autonomía energética	20
2.4.1 Antecedentes del uso de energía solar en plataformas autónomas	21
2.5 Estaciones solares para recarga: perspectivas y aplicaciones	23
2.6 Fundamentos básicos de diseño naval	25
2.6.1 Dimensiones principales	25
2.6.2 Plano de formas	25
2.6.3 Coeficientes de forma	26
2.6.4 Estabilidad del buque.....	26
2.6.5 Vehículos marinos y configuraciones avanzadas	29
2.6.6 Tipos de motores en propulsión marina.....	30
2.6.7 Tipos de hélices en propulsión marina	31
3 Desarrollo del TFG.....	32
3.1 Perfil de misión	32
3.1.1 Despliegue de la plataforma	32

3.1.2 Tipo de Misión.....	32
3.1.3 Movimientos Operacionales	33
3.1.4 Consumo Energético de los Motores.....	33
3.1.5 Uso de los Drones	33
3.1.6 Autonomía de la Plataforma	34
3.1.7 Conclusión	34
3.2 Tipo de plataforma naval	34
3.3 Dimensiones de la plataforma.....	35
3.3.1 Juego de dimensiones	35
3.3.2 Coeficientes	37
3.3.3 Estudio de potencia.....	39
3.4 Motor.....	42
3.5 Estaciones de recarga	44
3.6 Sistema energético	47
3.6.1 Balance energético.....	47
3.6.2 Baterías	49
3.6.3 Paneles solares	52
3.6.4 MPPT.....	54
3.6.5 Convertidores.....	56
3.6.6 Protecciones	57
4 Resultados y validación.....	59
4.1 Resumen de los estudios realizados	59
4.2 Características del catamarán.....	59
4.3 Disposición general.....	61
4.4 Validación del diseño	61
4.4.1 Estabilidad	62
4.4.2 Sistema de propulsión.....	62
4.4.3 Producción de energía solar.....	62
4.4.4 Circuito eléctrico	62
4.5 Presupuesto	63
4.6 Comparación con expectativas iniciales	63
4.7 Implicaciones de los resultados.....	64
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras.....	66
6 Bibliografía.....	67

Anexo I: Implicaciones sociales, económicas, y ambientales.....	72
Anexo II: Reflexiones éticas y sociales.....	73
Anexo III: Análisis de la estabilidad.....	74
Anexo IV: Base de datos de catamaranes.....	75
Anexo V: Estudio CFD.....	76
Anexo VI: Unifilar de la instalación.....	77
Anexo VII: Especificaciones de fabricante.....	78
Anexo VIII: Producción de las placas solares.....	79
Anexo IX: Disposición general y detalles.....	80
Anexo X: Presupuesto.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 DH 82B Queen Bee [12].	13
Figura 2-2 El MQ-1 Predator asignado a la 163ª Ala de Reconocimiento [16].	13
Figura 2-3 Concepto de operaciones en el campo de batalla del futuro [7].	14
Figura 2-4 Arquitectura fundamental de un USV típico [20].	17
Figura 2-5 Uso de los UVV en el ámbito civil y militar.	18
Figura 2-6 Plataforma de recarga inalámbrica de drones [31].	20
Figura 2-7 Principios de funcionamiento del Wave Glider [36].	21
Figura 2-8 Un dron impulsado por energía solar fabricado por Google Titan [41].	22
Figura 2-9 Tûranor PlanetSolar [44].	23
Figura 2-10 Dimensiones principales de un barco [48].	25
Figura 2-11 Planos principales para definir la geometría de la carena [49].	26
Figura 2-12 Geometría de los puntos relacionados con la estabilidad del buque [49].	27
Figura 2-13 Representación esquemática del metacentro.	28
Figura 2-14 Tipos de cascos.	30
Figura 2-15:Tipos de motores en propulsión marina.	31
Figura 2-16 Modelos de hélices.	31
Figura 3-1 Eslora en función de la manga.	35
Figura 3-2 Calado en función de la manga.	36
Figura 3-3 Motor POD Drive 3.0 de ePropulsion [67].	44
Figura 3-4 Método de cambio de batería Atlas Hextronics [68].	44
Figura 3-5 Estación de recarga para drones Universal de Hextronics [68].	46
Figura 3-6 Resumen gráfico del sistema energético.	47
Figura 3-7 Distribución de las placas solares.	54
Figura 3-8 Victron SmartSolar 250/100 [74].	55
Figura 3-9 Presentación del software Victron Cerbo GX.	56
Figura 4-1 Representación en Autodesk Inventor de la plataforma.	61
Figura 4-2 Disposición general del catamarán.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Peso total máximo estimado.	37
Tabla 3-2 Características básicas de la plataforma.	37
Tabla 3-3 Base de datos de motores.	43
Tabla 3-4 Características de Hextronics Universal [68].	45
Tabla 3-5 Drones compatibles con la plataforma Hextronics Universal [68].	46
Tabla 3-6 Balance energético.	48
Tabla 3-7 Base de datos de baterías.	50
Tabla 3-8 Distribución y características técnicas del sistema de baterías.	51
Tabla 3-9 Base de datos de paneles solares.	53
Tabla 3-10 Características SunPowerMAX3-420-BLK y TSM-510 NEG18R.28.	54
Tabla 4-1 Resumen características principales de la plataforma.	60

DICCIONARIO DE SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACV: *Air Cushion Vehicle* – Vehículo de Cojín de Aire

ASC: *Autonomous Surface Craft* – Embarcación de Superficie Autónoma

BMS: *Battery Management System* – Sistema de Gestión de Baterías

BVLOS: *Beyond Visual Line of Sight* – Más Allá de la Línea de Visión

CFD: *Computational Fluid Dynamics* – Dinámica de Fluidos Computacional.

CPP: *Controllable Pitch Propeller* – Hélice de Paso Variable

DAB: *Drone in a Box* – Estación Autónoma de Drones

DC: *Direct Current* – Corriente Continua

EMBAS: Embarcaciones de Asalto

FPP: *Fixed Pitch Propeller* – Hélice de Paso Fijo

GNC: *Guidance, Navigation and Control* – Guiado, Navegación y Control

GPS: *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamiento Global

HVAC: *Heating, Ventilation and Air Conditioning* – Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado

IM: *Induction Motor* – Motor de Inducción

ISR: *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance* – Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento

LCM: *Landing Craft Mechanized* – Lanchas Mecanizadas de Desembarco

LIDAR: *Light Detection and Ranging* – Detección y Medición por Láser

MPP: *Maximum Power Point* – Punto de Máxima Potencia

MPPT: *Maximum Power Point Tracking* – Seguimiento del Punto de Máxima Potencia

P&O: *Perturb and Observe* – Algoritmo de Seguimiento MPPT

POD: *Pod Drive* – Sistema de Propulsión en Cápsula

PRFV: Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio

PV: *Photovoltaic* – Fotovoltaica

PVGIS: *Photovoltaic Geographical Information System* – Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico.

SAR: *Search and Rescue* – Búsqueda y Rescate

SES: *Surface Effect Ship* – Buque de Efecto de Superficie

SM: *Synchronous Motor* – Motor Síncrono

SWATH: *Small Waterplane Area Twin Hull* – Casco Doble con Área Reducida en Línea de Flotación

TCS: *Tactical Control System* – Sistema de Control Táctico

UAV: *Unmanned Aerial Vehicle* – Vehículo Aéreo No Tripulado

USV: *Unmanned Surface Vehicle* – Vehículo de Superficie No Tripulado

UUV: *Unmanned Underwater Vehicle* – Vehículo Submarino No Tripulado

VLOS: *Visual Line of Sight* – Línea de Visión Directa

Voc: *Voltage Open Circuit* – Voltaje en Circuito Abierto

VTOL: *Vertical Take-Off and Landing* – Despegue y Aterrizaje Vertical

WIG: *Wing In Ground effect vehicle* – Vehículo de Efecto Suelo

WPT: *Wireless Power Transfer* – Transferencia de Energía Inalámbrica

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

La principal motivación de este trabajo es abordar una de las mayores limitaciones de los drones, su autonomía, que depende en gran medida del suministro de energía, habitualmente proporcionado por baterías de polímero de litio (LiPo). Aunque existen opciones como el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, la incorporación de motores de combustión interna o la implementación de sistemas híbridos, el uso de estaciones de acoplamiento también supone una solución prometedora para la extensión de la autonomía de estos sistemas. Estas estaciones tienen la capacidad de recargar o reemplazar baterías de forma automática, almacenar los UAVs (vehículos aéreos no tripulados) y establecer comunicación con ellos. Al hacerlo, no solo solucionan el problema de la autonomía, sino que también representan un avance significativo hacia la automatización completa de los sistemas UAV, optimizando su rendimiento y ampliando su potencial operativo [1].

Otra de las motivaciones de este trabajo es desarrollar una herramienta autónoma que minimice la necesidad de intervención humana en operaciones críticas. Esto responde a la necesidad de evitar bajas humanas y a los desafíos que enfrentan las sociedades contemporáneas. Por un lado, el diálogo y la negociación son métodos para evitar conflictos, pero no siempre son efectivos frente a adversarios dispuestos a arriesgar vidas para alcanzar sus objetivos. Por otro lado, la superioridad tecnológica, sustentada en sistemas autónomos como drones aéreos, embarcaciones de superficie y vehículos submarinos no tripulados, ofrece una solución que permite realizar operaciones con alta precisión y menor riesgo humano [2].

El uso de drones en el ámbito militar no solo ha cambiado las tácticas tradicionales, sino que también ha permitido abordar desafíos estratégicos con una eficacia sin precedentes. Su versatilidad, combinada con su capacidad para operar en entornos complejos, los posiciona como una herramienta clave para el presente y el futuro de las operaciones de defensa [3]. En este contexto, el desarrollo y la integración de drones con plataformas autónomas como naves nodrizas o estaciones de acoplamiento representan un avance crucial hacia una mayor autonomía y sostenibilidad en los sistemas militares.

Este trabajo propone abordar estas necesidades mediante el diseño y desarrollo de una plataforma naval autónoma, concebida principalmente para la recarga de drones aéreos. Además de su función principal, la plataforma servirá como un espacio de almacenamiento seguro, protegiendo los drones de condiciones adversas cuando no se encuentren en operación. Adicionalmente, la plataforma actuará como un nodo de comunicación, permitiendo el intercambio de información con los drones y la transmisión de órdenes específicas, optimizando así su desempeño en diversas misiones.

La principal función de esta plataforma será apoyar a UAVs diseñados para tareas de vigilancia y reconocimiento. Dada la ausencia de limitaciones significativas de velocidad en la plataforma, su

propósito no será operar directamente en zonas de combate o desplegar drones en misiones ofensivas cercanas a enemigos. En cambio, la plataforma actuará como un punto intermedio para la recarga y gestión de estos drones, extendiendo significativamente su tiempo operativo y su alcance.

1.2 Contexto

Las embarcaciones de superficie autónomas (ASC), también conocidas como vehículos de superficie autónomos (USV), son vehículos marinos no tripulados diseñados para operar en la superficie del agua. Aunque su uso abarca diversas aplicaciones, han tenido un impacto significativo en el ámbito militar, donde destacan por su potencial estratégico. Este interés ha impulsado el desarrollo y despliegue de sistemas USV avanzados, fruto de colaboraciones entre empresas privadas y agencias gubernamentales de defensa a nivel global [4].

Dentro del ecosistema de vehículos no tripulados, los UAV, USV y UUV (vehículos submarinos no tripulados) destacan por sus características específicas que les permiten abordar una amplia gama de misiones. Los UAV son esenciales para tareas de vigilancia aérea, los UUV están diseñados para exploración submarina, y los USV actúan como plataformas versátiles en la superficie del agua, capaces de coordinar operaciones conjuntas con otros sistemas autónomos [1].

Dentro de este ecosistema, los drones han destacado especialmente en el ámbito militar, donde han transformado tanto la naturaleza de los conflictos como las estrategias utilizadas en ellos. Su capacidad para operar en una amplia variedad de escenarios ha permitido que sean empleados en tareas cruciales, como el reconocimiento, la vigilancia, el combate y el apoyo logístico. Estos dispositivos no tripulados ofrecen ventajas únicas al minimizar los riesgos para el personal humano, permitiendo ejecutar operaciones en entornos hostiles de forma más segura y eficiente [3].

En el campo del reconocimiento y la vigilancia, los drones han demostrado ser indispensables al proporcionar información en tiempo real mediante sensores avanzados, cámaras de alta resolución y sistemas de radar. Esta capacidad ha sido fundamental para la recopilación de inteligencia y la supervisión continua en áreas estratégicas, facilitando una mejor toma de decisiones en tiempo crítico. Por otro lado, en misiones de combate, los drones destacan por su precisión quirúrgica, gracias al uso de tecnologías avanzadas de armamento y navegación, lo que permite reducir al mínimo los daños colaterales y aumentar la eficacia operativa [5].

Esta precisión también los convierte en una herramienta ideal para operaciones logísticas y multidominio. Su capacidad para transportar suministros a zonas remotas o de difícil acceso asegura un soporte continuo a las tropas desplegadas en operaciones prolongadas. También han jugado un papel clave en misiones multidominio, integrándose con otros sistemas para coordinar esfuerzos en tierra, mar y aire, generando efectos combinados y decisivos en los conflictos modernos [3].

Estas capacidades no solo son posibles gracias a los avances en tecnologías específicas de los drones, sino también por su integración con plataformas autónomas como los USVs, que amplían su autonomía y alcance operativo. La integración de estas tecnologías es fundamental para optimizar recursos y garantizar la autonomía operativa en escenarios desafiantes. En particular, los USVs desempeñan un papel crucial como naves nodrizas, capaces de recargar UAVs, transferir datos y proporcionar instrucciones de navegación. Las estaciones de acoplamiento autónomas mejoran significativamente la eficiencia de los UAV, permitiendo la recarga o el intercambio automático de baterías, un elemento esencial para misiones prolongadas y exigentes [1].

Además, el desarrollo de plataformas de UAV de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) amplía aún más las capacidades operativas, especialmente en entornos donde las condiciones son adversas o el espacio es limitado. Este enfoque no solo aumenta la autonomía de los sistemas, sino que también mejora la eficacia operativa al reducir la necesidad de intervención humana directa [6] [4].

1.3 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño de un sistema de recarga basado en energía solar para vehículos no tripulados operando en entornos marítimos. Se busca desarrollar una solución que permita maximizar la autonomía de estos sistemas, reduciendo su dependencia de infraestructuras convencionales y optimizando su eficiencia energética.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar los tipos de vehículos no tripulados adecuados para integrar el sistema de recarga.
- Evaluar la viabilidad de los sistemas de acoplamiento y transferencia de energía para drones aéreos.
- Diseñar un sistema de captación y almacenamiento de energía basado en tecnología fotovoltaica.
- Definir la estructura de la plataforma asegurando estabilidad, resistencia y eficiencia en la integración de los sistemas eléctricos.
- Comparar diferentes configuraciones para determinar la opción más viable en términos de rendimiento y operatividad.
- Estimar el coste de obtención e implementación del sistema, considerando su viabilidad económica.

1.4 Metodología

Para el desarrollo del trabajo, se seguirá la siguiente metodología:

1. Selección del tipo de USV: se estudiarán diferentes opciones para determinar la configuración más adecuada para la plataforma.
2. Diseño del sistema de captación y almacenamiento de energía: se seleccionarán paneles solares, baterías y convertidores en función de su eficiencia, peso y resistencia en entornos marítimos.
3. Estudio de estrategias de recarga: se evaluarán diferentes métodos de acoplamiento y transferencia de energía para drones aéreos, identificando las tecnologías más viables.
4. Definición de la estructura de la plataforma: se diseñará una configuración óptima que garantice estabilidad y operatividad, considerando simulaciones hidrodinámicas para evaluar el impacto en la navegación.
5. Estimación del coste del sistema: se realizará una evaluación económica del proyecto, considerando los costos de adquisición, e instalación.
6. Obtención del presupuesto final: a partir de los estudios previos, se determinará el coste total del sistema y su viabilidad financiera en comparación con otras soluciones de abastecimiento energético.

Esta metodología permitirá obtener un sistema de recarga autónomo optimizado para vehículos no tripulados en entornos marítimos, garantizando su viabilidad operativa y su sostenibilidad económica.

1.5 Estructura de la memoria

Tras contextualizar el trabajo en el ámbito de las plataformas navales autónomas para la recarga de drones y definir los objetivos a alcanzar, se procede a describir la estructura de la memoria, con el objetivo de presentar de manera clara y ordenada los trabajos realizados y los resultados obtenidos. El documento se organiza en cinco capítulos, seguidos de la bibliografía y los anexos, que proporcionan información complementaria al desarrollo del trabajo. La estructura es la siguiente:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos. Se introduce el problema abordado, destacando la importancia de la autonomía en los drones aéreos y la necesidad de un sistema de recarga eficiente en entornos marítimos. Se contextualiza el trabajo en el marco de la ingeniería naval y se presentan los objetivos específicos del proyecto, así como la metodología empleada para su desarrollo.
- Capítulo 2. Estado del arte. Se ofrece una revisión del contexto tecnológico en el que se encuadra el proyecto. Se analizan los avances en vehículos no tripulados, las fuentes de energía renovables aplicadas en plataformas marítimas y las tecnologías existentes para la recarga de drones. También se examinan los estudios previos y soluciones similares desarrolladas en este ámbito. Por último, se realiza una pequeña introducción a los conceptos básicos de la arquitectura naval.
- Capítulo 3. Desarrollo del TFG. Se describen en detalle el diseño y configuración de la plataforma, incluyendo su estructura, sistema de propulsión, almacenamiento energético y estación de recarga de drones. Además, se justifican las decisiones técnicas adoptadas y se presentan los cálculos de estabilidad, balance energético y viabilidad estructural.
- Capítulo 4. Resultados obtenidos y validación. Se presentan los resultados de las simulaciones y análisis realizados para validar el diseño de la plataforma. Se estudian aspectos como la estabilidad hidrodinámica, la eficiencia del sistema de propulsión, la autonomía energética y la capacidad de recarga de drones. También se comparan los resultados con las expectativas iniciales y se discuten las implicaciones del diseño.
- Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras. Se resumen las principales conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo y se identifican las posibles mejoras y futuras líneas de investigación.
- Bibliografía. Se recogen todas las fuentes utilizadas para el desarrollo del trabajo, incluyendo artículos científicos, normativas y documentación técnica relevante.
- Anexos. Se incluyen estudios adicionales que complementan el contenido principal de la memoria, como el análisis de estabilidad del catamarán, la base de datos de catamaranes analizados, el estudio CFD del comportamiento hidrodinámico, el balance energético detallado, el esquema eléctrico de la plataforma y el presupuesto estimado.

2 ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de plataformas autónomas para la recarga de drones ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por la necesidad de extender la autonomía operativa de estos sistemas [7]. Esta sección explora los principales avances y clasificaciones dentro del ámbito de los vehículos autónomos, abarcando sus aplicaciones, tecnologías de carga y fuentes de energía renovables. Asimismo, se analiza la interacción entre drones y estaciones de recarga, así como el papel de la energía solar en la autonomía energética de estas plataformas.

2.1 Evolución histórica y tecnológica

Los drones, dispositivos que hoy en día tienen aplicaciones diversas, desde usos recreativos hasta tareas militares y civiles, tienen una historia que se remonta al siglo XIX. Su desarrollo ha sido influenciado principalmente por las necesidades militares, evolucionando desde prototipos rudimentarios hasta las avanzadas tecnologías actuales.

2.1.1 Orígenes de los drones

La idea de un vehículo aéreo sin piloto comenzó a gestarse a finales del siglo XIX. En 1849, los ejércitos austriacos utilizaron globos aerostáticos cargados con explosivos contra Venecia. Aunque carecían de control remoto, estos globos representan un antecedente histórico en el uso de vehículos aéreos no tripulados [8].

Durante la Primera Guerra Mundial, se desarrolló el "Kettering Bug", un dispositivo con forma de avión que se lanzaba desde un carro con rieles. Aunque no se usó en combate, este prototipo incorporaba elementos esenciales que serían la base de las máquinas controladas a distancia en el futuro. Su diseño incluía un fuselaje cargado con explosivos, que impactaba como un torpedo en su objetivo, pero no era controlable ni reutilizable [9].

El primer dron propiamente dicho apareció en 1935: el DH 82B Queen Bee, Figura 2-1, creado por la Marina Real Británica para prácticas de tiro. Este dispositivo era controlado remotamente, podía despegar, aterrizar y ser reutilizado si no sufría daños significativos. Inspirado por este modelo, el comandante Delmer Fahrney de la Marina de los Estados Unidos trabajó en el desarrollo de drones similares y les dio el nombre de "*drone*", en referencia al masculino de "abeja" (*bee*), consolidando así el término que conocemos hoy [10].

Durante la Segunda Guerra Mundial, los avances en aviación no tripulada se centraron en misiones de reconocimiento y recopilación de inteligencia. Países como Estados Unidos, la Unión Soviética, Francia y Japón lideraron el diseño de drones rudimentarios, que gradualmente incorporaron mejoras en los sistemas de control remoto y la capacidad de volar a mayores altitudes con mayor autonomía [11].



Figura 2-1 DH 82B Queen Bee [12].

La Guerra Fría trajo avances significativos debido a la necesidad de soluciones seguras para la recopilación de inteligencia. El Ryan Firebee, desarrollado en la década de 1950, se convirtió en un pilar fundamental para la observación remota en territorios hostiles y fue ampliamente utilizado en la Guerra de Vietnam. Estos drones demostraron su valor en la recopilación de inteligencia en tiempo real bajo fuego enemigo [13].

En las décadas de 1970 y 1980, los UAVs evolucionaron gracias a la introducción de sensores digitales, navegación GPS y sistemas de vuelo más autónomos. Este avance culminó con el programa Predator, Figura 2-2, de los Estados Unidos en la década de 1990, que revolucionó los UAVs al integrarlos tanto para vigilancia como para ataques dirigidos [14]. Su debut operativo en 1995 destacó por sus capacidades de reconocimiento, pero la adición de misiles Hellfire a principios de los 2000 convirtió al Predator en una plataforma de ataque letal. Esto marcó un antes y un después al reducir drásticamente el tiempo de respuesta en misiones críticas [15].



Figura 2-2 El MQ-1 Predator asignado a la 163ª Ala de Reconocimiento [16].

En vuelo sobre el Aeropuerto Logístico del Sur de California (anteriormente la Base de la Fuerza Aérea George) en Victorville, California, el 7 de enero de 2012.

En las últimas décadas, la convergencia de tecnologías avanzadas ha transformado la industria de los UAVs. Innovaciones en cámaras digitales, microprocesadores, comunicación inalámbrica y materiales ultraligeros han permitido la creación de dispositivos más pequeños, potentes y versátiles. Estas características han llevado a una diversificación masiva de aplicaciones en sectores como la agricultura, la vigilancia ambiental, el cine y la investigación científica [11].

El futuro de los drones estará definido por la integración de la inteligencia artificial (IA), lo que permitirá capacidades sin precedentes. Los drones impulsados por IA se adaptarán de forma autónoma a escenarios dinámicos, optimizarán estrategias de misión en tiempo real y mejorarán el procesamiento de datos. Además, podrán operar en enjambres colaborativos, como se muestra en la Figura 2-3 compartiendo información al instante para lograr superioridad táctica. Estas capacidades no solo mejorarán la efectividad operativa, sino que también plantearán interrogantes éticas y la necesidad de establecer mecanismos claros de responsabilidad [17].

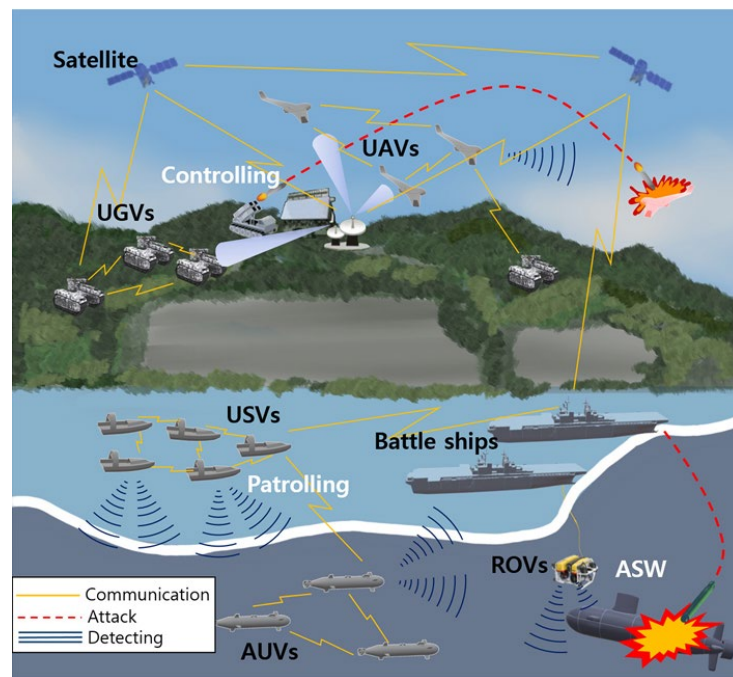


Figura 2-3 Concepto de operaciones en el campo de batalla del futuro [7].

2.1.2 Desarrollo histórico de las plataformas autónomas navales

El desarrollo de las plataformas autónomas navales (UMVs) ha tenido un progreso relativamente lento en comparación con vehículos autónomos terrestres y aéreos, debido a las condiciones adversas en los entornos marinos. Sin embargo, su historia se remonta a la Segunda Guerra Mundial, cuando se introdujeron tecnologías emergentes para operaciones específicas. Durante este periodo, los UMVs se usaron por primera vez en operaciones de barrido de minas, evaluación de daños de combate, recolección de muestras de agua y recuperación de equipos perdidos [7].

En 1944, Canadá desarrolló el primer vehículo de superficie no tripulado (USV), conocido como Comox, diseñado para la Operación Normandía. Su objetivo era realizar operaciones de cortina de humo en lugar de aviones y apoyar el desminado y la demolición de embarcaciones con cohetes. Aunque exitoso en pruebas, no fue utilizado operativamente. En paralelo, Estados Unidos diseñó los USVs Porcupine, Bob-Sled, y Woofus 120, equipados con cohetes para remover minas y obstáculos. Posteriormente, en 1946, se emplearon embarcaciones no tripuladas como Able y Baker para recolectar muestras de radiación tras detonaciones nucleares [7].

A partir de la década de 1950, los USVs comenzaron a emplearse con mayor frecuencia para desminado. Durante la Guerra de Vietnam, en los años 60, se desplegaron drones más grandes diseñados para barrido de minas. En los 90, surgieron sistemas más avanzados como R/C Dyads, Moss, y ALISS

para tareas similares. Este avance tecnológico culminó en sistemas sofisticados de desminado como Brown, Palmer, y Brizzola [7].

Simultáneamente, los vehículos autónomos submarinos (AUVs) comenzaron a evolucionar en la segunda mitad del siglo XX. Estos desarrollos se vieron potenciados por avances en electrónica y software, que incrementaron la precisión y autonomía de los sistemas. Desde finales de los años 90, los USVs y AUVs ampliaron su uso a actividades como vigilancia portuaria, monitoreo marítimo y levantamientos hidrográficos [18].

El progreso en sensores, propulsión y autonomía ha permitido que estas plataformas desempeñen roles cada vez más complejos. Sin embargo, la evolución histórica de las UUVs sigue marcada por desafíos técnicos y económicos que limitan su adopción masiva. La confianza de los usuarios y la diversificación de sus aplicaciones continúan siendo pilares fundamentales en el desarrollo de esta tecnología [18].

2.2 Clasificación de vehículos autónomos

En el contexto de los sistemas autónomos, los vehículos no tripulados han experimentado un desarrollo acelerado en diversas áreas, permitiendo la automatización de tareas críticas en entornos aéreos, marítimos y submarinos [19]. La clasificación de estos vehículos se basa en su ámbito de operación, destacándose los vehículos aéreos no tripulados (UAV), los vehículos de superficie no tripulados (USV) y los vehículos submarinos no tripulados (UUV) [20]. Cada uno de estos sistemas presenta características particulares que los hacen idóneos para distintas aplicaciones en sectores como la defensa, la exploración científica, la seguridad, la logística y la gestión de recursos naturales.

Los avances en sensores, navegación autónoma y almacenamiento energético han permitido que estos vehículos amplíen sus capacidades operativas, facilitando su integración en misiones que tradicionalmente dependían de sistemas tripulados. Sin embargo, cada categoría enfrenta desafíos tecnológicos y regulatorios que limitan su autonomía y eficiencia en determinados escenarios [21]. A continuación, se explorarán las principales características, aplicaciones y retos de cada tipo de vehículo autónomo.

2.2.1 Vehículos aéreos no tripulados (UAV): características y aplicaciones

Los vehículos aéreos no tripulados son sistemas diseñados para operar sin la necesidad de un piloto a bordo, ya sea mediante control remoto o de manera completamente autónoma. Su arquitectura combina sensores avanzados, sistemas de navegación y comunicación, y una fuente de propulsión eficiente, lo que les permite realizar una amplia gama de misiones en entornos que a menudo serían inaccesibles o peligrosos para humanos [22].

Los UAV tienen aplicaciones tanto civiles como militares, lo que los convierte en una tecnología versátil. En el ámbito militar, destacan por su uso en inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR), así como en misiones ofensivas controladas remotamente. Por otro lado, en sectores civiles, se utilizan para monitorear cultivos en la agricultura de precisión, inspeccionar infraestructuras, gestionar desastres, controlar el tráfico y realizar entregas logísticas [22]. Su capacidad para recopilar datos en tiempo real los hace indispensables en situaciones críticas, como incendios forestales o búsquedas y rescates [23].

Entre las ventajas más destacadas de los UAV se encuentra su capacidad para operar sin poner en riesgo vidas humanas, su adaptabilidad para ser equipados con diferentes tipos de sensores y cámaras, y su capacidad para realizar misiones en tiempo real con alta precisión. Además, ofrecen costos operativos más bajos en comparación con aeronaves tripuladas y pueden llegar a áreas remotas o peligrosas donde sería imposible o muy peligroso enviar personal [23] [24].

Por ejemplo, los UAV multirrotores, como los cuadricópteros, son especialmente valorados por su capacidad de aterrizaje y despegue vertical, lo que les permite operar en espacios reducidos. Por otro

lado, los UAV de ala fija destacan por su autonomía y eficiencia energética, haciéndolos ideales para misiones de larga distancia, como mapeo aéreo y monitoreo ambiental [22].

A pesar de sus beneficios, los UAV enfrentan varias limitaciones técnicas. Una de las principales es su autonomía, que está restringida por la capacidad de las baterías, limitando su tiempo de vuelo y alcance. Aunque se están desarrollando tecnologías como estaciones de carga inalámbrica y sistemas de intercambio automático de baterías, estas soluciones aún enfrentan desafíos prácticos y de implementación [23]. Además, las condiciones climáticas adversas, como el viento fuerte o la lluvia, pueden afectar significativamente su desempeño y estabilidad durante el vuelo [24].

Otro reto importante es la capacidad de carga útil, que en modelos pequeños es limitada. Esto restringe el tipo de sensores o equipos que pueden transportar, especialmente en aplicaciones que requieren dispositivos más pesados, como cámaras térmicas o equipos LIDAR [23]. Asimismo, el uso compartido del espacio aéreo presenta retos regulatorios que varían entre regiones, limitando su integración en ambientes urbanos [24].

El desarrollo de los UAV se encuentra en constante avance, impulsado por innovaciones como la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático, que optimizan su autonomía en tareas como planificación de trayectorias, detección de obstáculos y toma de decisiones. Las investigaciones actuales también se centran en soluciones para extender su autonomía, incluyendo estaciones de carga inalámbrica, sistemas de propulsión híbrida y el uso de paneles solares. En el futuro, se espera que los UAV jueguen un rol clave en sectores como la logística, la gestión ambiental y las operaciones de emergencia, consolidándose como una herramienta esencial en diversas industrias [23].

2.2.2 Vehículos de superficie no tripulados (USV): características y aplicaciones

Los vehículos de superficie no tripulados son plataformas marinas autónomas o controladas remotamente diseñadas para llevar a cabo misiones en la superficie del agua sin la necesidad de una tripulación a bordo. Estos vehículos están equipados con tecnologías avanzadas de navegación, propulsión y comunicación, lo que les permite operar en una amplia variedad de condiciones, desde aguas tranquilas hasta mares agitados. Sus diseños varían desde formas tradicionales de casco hasta configuraciones innovadoras como catamaranes, trimaranes y semisumergibles, optimizadas para diferentes aplicaciones [25] [19] [20].

Los USV dependen de subsistemas clave como mecanismos de propulsión, sistemas de guía y sensores ambientales para garantizar una operación precisa. Muchos de ellos también incluyen capacidades de transmisión de datos en tiempo real, permitiendo a los operadores supervisar y controlar las misiones a distancia. Además, los sistemas modulares de carga útil los hacen adaptables a diversas tareas, desde monitoreo ambiental hasta operaciones de defensa [26] [20]. Estas características y componentes pueden observarse en la Figura 2-4, que muestra la arquitectura fundamental de un USV típico y sus principales subsistemas.

Los USV tienen aplicaciones versátiles en sectores militares, comerciales y científicos. En el ámbito militar, se utilizan para contramedidas contra minas, guerra antisubmarina, seguridad marítima e inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR). Su capacidad para operar de forma autónoma en zonas de alto riesgo los hace indispensables para las fuerzas navales modernas. Por ejemplo, durante la Guerra del Golfo, los USV demostraron su efectividad en la detección y eliminación de minas [19].

En los campos civiles y comerciales, los USV desempeñan un papel crucial en tareas como el monitoreo ambiental, la gestión de desastres y la exploración de recursos. Se utilizan para recopilar datos sobre ecosistemas marinos, mapear topografía submarina, inspeccionar infraestructuras marítimas y gestionar derrames de petróleo. Estas capacidades son especialmente valiosas en áreas peligrosas o de difícil acceso para los buques tripulados, como regiones polares o zonas afectadas por desastres [20].

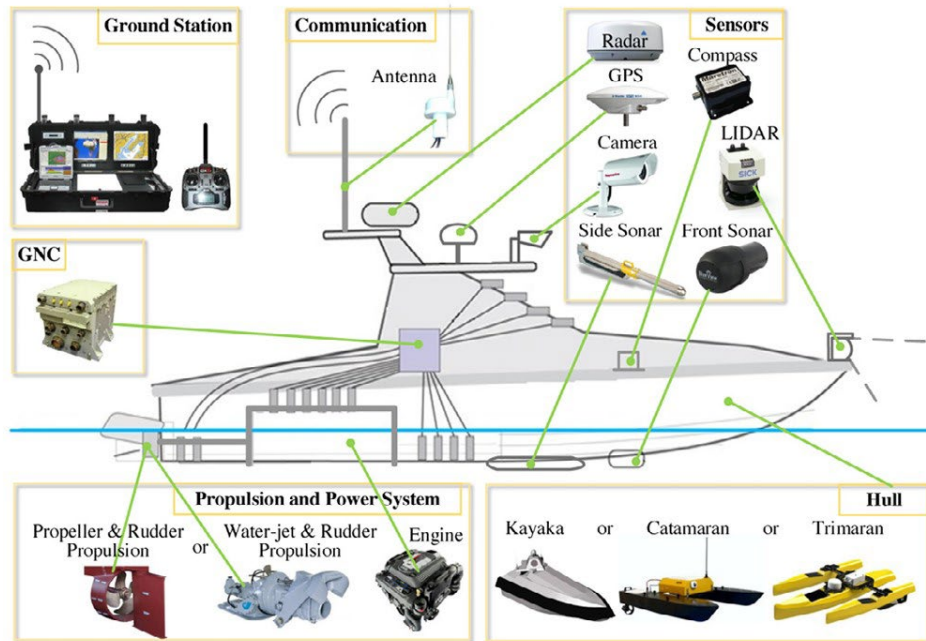


Figura 2-4 Arquitectura fundamental de un USV típico [20].

Los USV ofrecen numerosas ventajas en comparación con los buques tripulados tradicionales. Son rentables, ya que eliminan la necesidad de una tripulación a bordo, reduciendo costos operativos y riesgos. Su capacidad para realizar misiones de larga duración de forma autónoma permite una recolección de datos y vigilancia eficiente. Además, son altamente maniobrables y pueden operar tanto en aguas costeras poco profundas como en océanos abiertos, lo que los hace versátiles para diversas misiones [20].

Asimismo, su capacidad modular para transportar diferentes equipos, como sistemas de sonar, cámaras y sensores ambientales, los hace adaptables a las necesidades cambiantes de la misión [25]. Los USV también pueden operar en enjambres, ofreciendo capacidades mejoradas para tareas coordinadas, como el monitoreo de grandes áreas marítimas o la realización de estudios sincronizados [7].

A pesar de sus ventajas, los USV enfrentan varios desafíos. Su dependencia de sensores avanzados y sistemas de comunicación los hace susceptibles a fallos en condiciones ambientales adversas, como olas altas, corrientes fuertes y clima extremo. Además, su autonomía limitada y dependencia de control remoto restringen su efectividad en entornos marítimos complejos y dinámicos. A esto se suman los retos técnicos y regulatorios relacionados con la evitación de colisiones y la integración en los sistemas de tráfico marítimo existentes [20].

El desarrollo de los USV se centra en alcanzar una autonomía completa, permitiendo que estos sistemas operen en entornos complejos y no estructurados con una mínima intervención humana. Los avances significativos en los sistemas de guía, navegación y control (GNC) están abordando desafíos como la planificación de rutas, la evitación de colisiones y la adaptación en tiempo real a las condiciones ambientales. Estas mejoras son esenciales para que los USV operen de manera confiable en condiciones marinas dinámicas y peligrosas [25].

La eficiencia energética es otra área crítica de investigación, con esfuerzos dirigidos hacia el desarrollo de USV alimentados por energías renovables, como paneles solares o la energía de las olas, para extender su autonomía operativa. Además, los diseños modulares se están volviendo cada vez más comunes, lo que permite que una única plataforma de USV se adapte a múltiples misiones mediante el intercambio de cargas útiles [25].

2.2.3 Vehículos submarinos no tripulados (UUV): características y aplicaciones

Los vehículos submarinos no tripulados son plataformas robóticas diseñadas para operar en ambientes submarinos sin la necesidad de una tripulación a bordo. Estos sistemas, que pueden ser autónomos o teleoperados, están equipados con avanzadas tecnologías de propulsión, navegación y sensores, lo que les permite realizar misiones complejas en ambientes marinos adversos, como aguas profundas o áreas de alta presión. Gracias a su diseño modular, los UUV se adaptan a una variedad de misiones mediante su diseño modular, que permite la integración de diferentes herramientas y equipos [21].

Los UUVs tienen un papel clave en operaciones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR), así como en la guerra antisubmarina, donde pueden rastrear y neutralizar submarinos enemigos. También se emplean para detección y eliminación de minas, utilizando sonares de baja frecuencia para mejorar la identificación en entornos submarinos complejos. Otros usos incluyen seguridad costera, defensa de puertos y protección de activos en aguas extranjeras, además de la interceptación de embarcaciones pequeñas en zonas litorales. En operaciones ofensivas, los UUVs pueden transportar explosivos, infiltrar buzos tácticos o inyectar información falsa en redes enemigas. También desempeñan un papel en ataques de alta precisión y rápida ejecución (TCS) para neutralizar objetivos estratégicos [27].

Inicialmente diseñados para la industria del petróleo y gas, los UUVs se utilizan en inspección de tuberías submarinas, monitoreo de infraestructuras y levantamientos hidrográficos. En el ámbito científico, han permitido el mapeo del fondo marino, análisis de corrientes oceánicas y estudios de bioluminiscencia. También se emplean para investigación de ecosistemas marinos, monitoreo del cambio climático y detección de desastres naturales, como derrames de petróleo o tsunamis. Su capacidad de operar en entornos extremos y de difícil acceso los convierte en herramientas esenciales para la exploración oceánica y la preservación de los ecosistemas marinos [27]. En la Figura 2-5 se muestra estas funciones de los UUV en los ámbitos militar y civil.

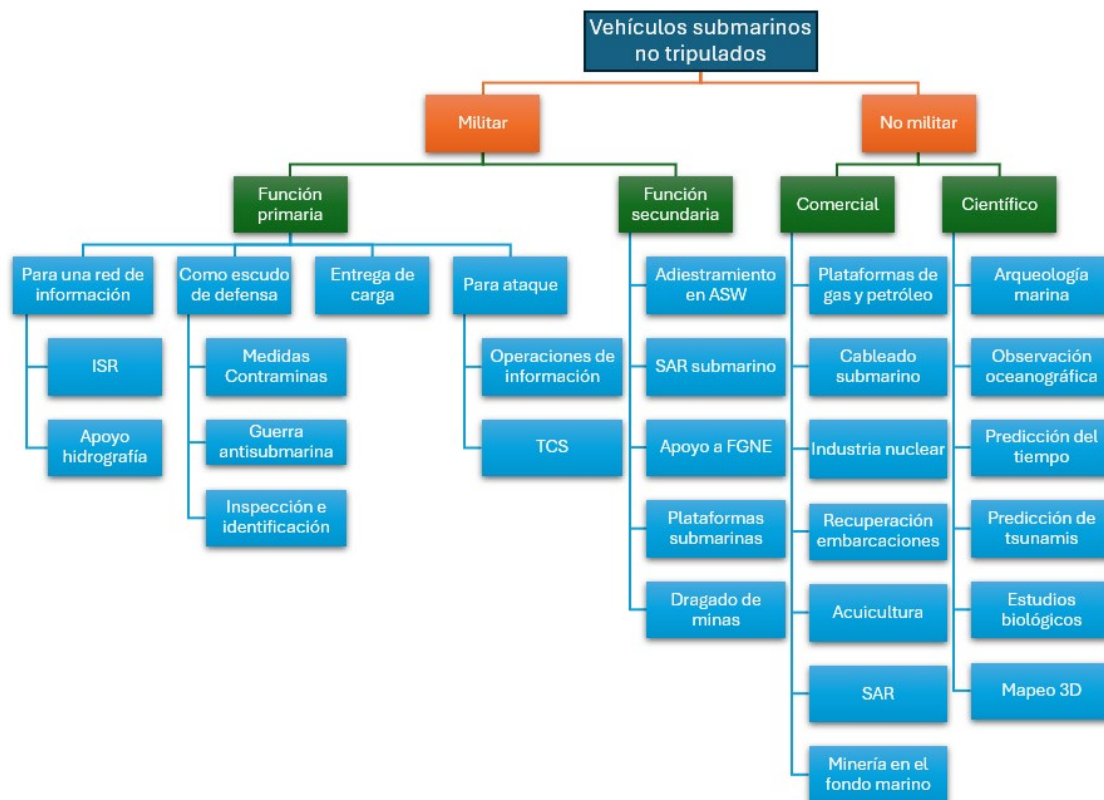


Figura 2-5 Uso de los UUV en el ámbito civil y militar.

Los UUVs presentan limitaciones significativas debido a su susceptibilidad a las corrientes y olas, lo que dificulta el control preciso de trayectoria y la estabilidad en el agua. La interacción entre las hélices requiere mayor estudio, especialmente para implementar sistemas de tolerancia a fallos en caso de avería. En misiones de búsqueda submarina, deben operar cerca del fondo marino, lo que demanda control de altura y evasión de obstáculos en entornos complejos. Además, la comunicación en aguas profundas y el seguimiento preciso en tiempo real siguen siendo desafíos críticos, dificultando la localización de objetivos pequeños en grandes áreas de exploración [28].

El desarrollo de los UUV se centra en superar desafíos clave, como la autonomía, la eficiencia energética y la comunicación submarina. Se están investigando baterías de mayor duración, tecnologías de carga inalámbrica y sistemas de propulsión híbridos para extender su tiempo de operación. Además, la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático está mejorando sus capacidades de navegación autónoma y toma de decisiones en entornos complejos y dinámicos [21].

Para mejorar el rendimiento de los UUVs, es fundamental avanzar en autonomía, eficiencia energética y comunicación submarina. Se requiere el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial para optimizar la toma de decisiones, junto con baterías de mayor capacidad y estaciones de recarga en el mar para extender su operatividad. Además, se deben mejorar los sensores de detección y el procesamiento de datos en tiempo real, permitiendo que los UUVs operen con mayor independencia [27].

Asimismo, es necesario fortalecer la comunicación y navegación submarina, mediante redes más eficientes y algoritmos de evasión de obstáculos, garantizando un mejor desempeño en entornos dinámicos. La implementación de sistemas automatizados de lanzamiento y recuperación, junto con diseños modulares e interoperables, facilitará su integración en diferentes misiones. Estas mejoras harán que los UUVs sean más autónomos, seguros y eficaces en tareas de reconocimiento, guerra antisubmarina y exploración submarina [27].

2.3 Interacción entre drones y plataformas autónomas

La integración de drones con plataformas autónomas es un factor clave en la evolución de estas tecnologías. Las estaciones de recarga representan un componente crítico para mitigar las limitaciones energéticas de los UAV, permitiendo su operación continua sin intervención humana [29]. En esta sección se revisan los avances en estaciones de recarga, los métodos de carga utilizados y la integración con energías renovables, destacando su impacto en la eficiencia y sostenibilidad de las misiones [30].

2.3.1 Estaciones de recarga para UAV: perspectiva actual

Las estaciones de recarga para vehículos aéreos no tripulados representan un componente crítico en la evolución de las tecnologías autónomas. Dado que la autonomía energética sigue siendo un desafío clave, estas estaciones buscan resolver problemas como la limitada duración de las baterías, la necesidad de operaciones continuas y la dependencia de la intervención humana para procesos de recarga y mantenimiento [1]

2.3.2 Avances tecnológicos en estaciones de recarga

1. Diseños autónomos y compactos las estaciones actuales integran tecnologías de automatización para aterrizaje, recarga y despegue sin intervención humana. Estas plataformas utilizan sistemas de posicionamiento visual y algoritmos avanzados de navegación para guiar a los UAV hacia puntos de aterrizaje precisos, incluso en condiciones desafiantes [1].
2. Métodos de recarga: se pueden distinguir diferentes métodos de recarga según la forma de contacto entre el dron y el sistema de transferencia de energía:
 - Recarga por contacto: este método se basa en la transferencia directa de energía a través de una conexión física entre la plataforma de carga y el UAV. Al aterrizar, el dron

establece contacto con puntos de carga que permiten la transferencia de electricidad a su batería. Este sistema ofrece una alta eficiencia energética y un menor tiempo de carga en comparación con métodos inalámbricos. No obstante, su principal desafío radica en la necesidad de una precisión extrema en el aterrizaje para garantizar una conexión estable y segura [30].

- **Recarga inalámbrica (WPT):** la carga inalámbrica se fundamenta en la transferencia inductiva o resonante de energía, evitando la necesidad de contacto físico entre el UAV y la estación de carga, como se muestra en la Figura 2-6. Este método minimiza el desgaste mecánico y aumenta la durabilidad del sistema, al eliminar la necesidad de componentes móviles que puedan fallar. Sin embargo, presenta limitaciones en términos de eficiencia, ya que las pérdidas de energía en la transmisión pueden ser significativas, además de que la velocidad de carga suele ser menor en comparación con los métodos de contacto directo [30].
- **Intercambio automático de baterías:** algunas estaciones avanzadas permiten un cambio rápido de baterías, maximizando el tiempo operativo del UAV. Este método, aunque más complejo, es ideal para misiones críticas o de larga duración [1].

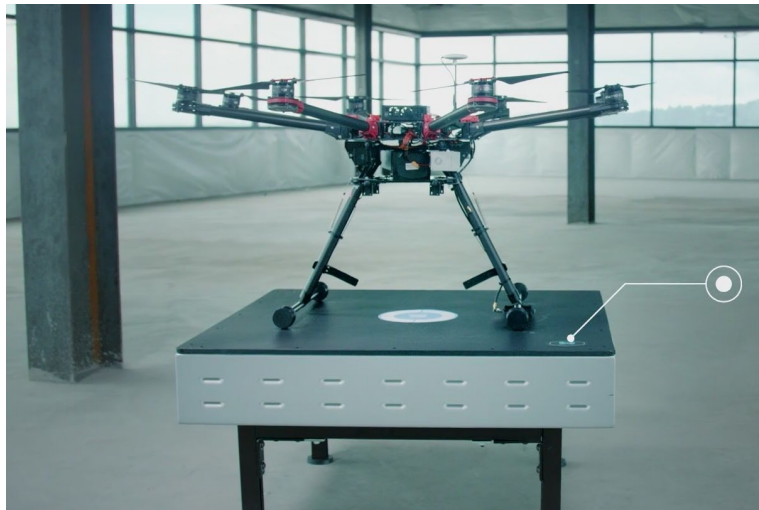


Figura 2-6 Plataforma de recarga inalámbrica de drones [31].

3. **Integración con Energías Renovables** muchas estaciones modernas incorporan paneles solares, permitiendo operar en áreas remotas sin acceso a redes eléctricas. Estas estaciones se diseñan para ser autosuficientes y sostenibles, utilizando almacenamiento energético a través de baterías para garantizar operaciones nocturnas o en condiciones de baja irradiación solar [29].

2.4 Energías renovables y autonomía energética

En el ámbito naval, el aprovechamiento de energías renovables ha cobrado relevancia como alternativa para reducir la dependencia de combustibles fósiles y aumentar la autonomía de diferentes tipos de embarcaciones. Entre las soluciones más empleadas destacan la energía eólica, implementada mediante tecnologías como las velas rígidas, o los rotores Flettner, capaces de generar importantes ahorros de combustible y reducción de emisiones. Estas tecnologías han demostrado un potencial considerable, con ahorros que pueden superar el 30 % bajo condiciones óptimas, especialmente en buques de carga de gran tamaño como los *bulk carriers* y los petroleros, que disponen de amplias superficies para la instalación de sistemas eólicos [32]. Por otro lado, la energía mareomotriz también ha sido aplicada en proyectos como el Wave Glider, que aprovecha la energía de las olas, como se muestra en la Figura 2-7, junto con sistemas solares, evidencian la diversidad de fuentes renovables con potencial para su integración en plataformas autónomas marítimas [33].

El uso de energías renovables en plataformas autónomas se ha convertido en una solución viable para extender su autonomía y reducir su dependencia de combustibles fósiles [34]. Dentro de estas soluciones, la energía solar ha demostrado ser una alternativa eficaz para alimentar estaciones de recarga de drones y sistemas autónomos operando en entornos remotos. Este apartado analiza los antecedentes del uso de energía solar en plataformas autónomas, sus ventajas y las innovaciones tecnológicas en este ámbito [35].

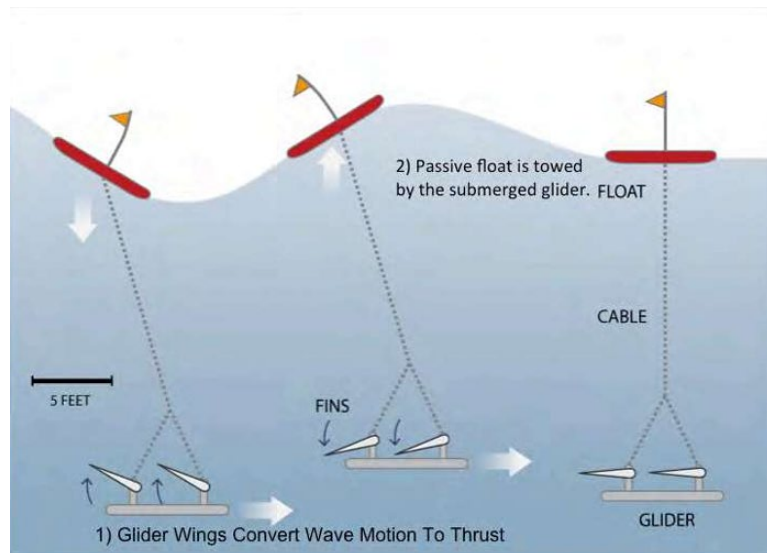


Figura 2-7 Principios de funcionamiento del Wave Glider [36].

2.4.1 Antecedentes del uso de energía solar en plataformas autónomas

El uso de la energía solar en plataformas autónomas ha experimentado un desarrollo significativo en las últimas décadas, consolidándose como una de las soluciones más viables para abordar la necesidad de fuentes de energía sostenibles en el sector marítimo. Esta tecnología ha mostrado ser particularmente efectiva en aplicaciones donde la autosuficiencia energética es prioritaria, como en drones marítimos, embarcaciones recreativas y sistemas de monitorización ambiental [34].

2.4.2 Ventajas del uso de la energía solar

Las embarcaciones y plataformas alimentadas por energía solar presentan varias ventajas clave:

- Bajas emisiones de gases de efecto invernadero: aunque la energía solar genera algunas emisiones durante su ciclo de vida, estas son significativamente menores en comparación con las fuentes fósiles, lo que contribuye a la reducción del impacto ambiental [37].
- Bajos niveles de ruido: los motores eléctricos reducen significativamente el ruido y las vibraciones, minimizando la contaminación acústica y su impacto en ecosistemas sensibles [38].
- Menor coste de mantenimiento: los sistemas fotovoltaicos no tienen partes móviles significativas, lo que simplifica la operación y reduce las necesidades de reparación [34].
- Independencia operativa: al generar y almacenar energía de manera autónoma, estas plataformas pueden operar en zonas remotas sin necesidad de apoyo externo [35] [4].

2.4.3 Evolución de las plataformas solares autónomas

Las primeras aplicaciones de energía solar en el ámbito marítimo comenzaron con proyectos experimentales que utilizaban paneles fotovoltaicos para alimentar pequeños barcos y drones marítimos. A lo largo del tiempo, estos sistemas se han sofisticado:

- Drones autónomos marítimos: equipados con paneles solares y baterías avanzadas, son utilizados para la monitorización científica, militar y ambiental [4]. Ejemplos como el "Solar AEGIR" integran tecnologías de energía solar con sistemas de navegación autónoma para misiones prolongadas [39].
- Barcos recreativos y turísticos: la implementación de sistemas fotovoltaicos en catamaranes y barcos monocascos ha permitido desarrollar embarcaciones capaces de operar en lagos, áreas protegidas y costas, con suficiente autonomía para cumplir misiones turísticas de bajo impacto [40].
- Plataformas solares autónomas aéreas: proyectos innovadores han llevado la energía solar al ámbito de la aviación no tripulada, permitiendo el desarrollo de drones de gran altitud que pueden operar durante largos periodos sin necesidad de repostar. Iniciativas como las desarrolladas por Google y Facebook han demostrado el potencial de estas plataformas para aplicaciones de conectividad global, proporcionando acceso a internet en zonas remotas donde la infraestructura terrestre es limitada. Estos sistemas, impulsados completamente por energía solar, han marcado un hito en la evolución de los UAVs autónomos, ofreciendo grandes rendimientos en términos de autonomía y eficiencia energética. Un ejemplo de esto es el dron Google Titan, diseñado para operar en altitudes elevadas y servir como plataforma de comunicaciones, como se muestra en la Figura 2-8 [23].



Figura 2-8 Un dron impulsado por energía solar fabricado por Google Titan [41].

- Proyectos experimentales destacados: Embarcaciones como el Tûranor PlanetSolar, Figura 2-9, que dio la vuelta al mundo en 2012, han demostrado el potencial de la energía solar en embarcaciones de mayor escala, posicionándose como un hito para futuros desarrollos [34].

2.4.4 Consideraciones técnicas y limitaciones

Aunque la tecnología solar ofrece numerosas ventajas, enfrenta desafíos importantes:

- Intermittencia y almacenamiento: la variabilidad en la irradiación solar requiere el uso de sistemas de almacenamiento energético robustos, como baterías de ion-litio, que incrementan los costos iniciales [35] [42].
- Eficiencia de los paneles solares: la eficiencia de los paneles fotovoltaicos puede verse afectada por factores ambientales, como el aumento de la temperatura, lo que reduce la producción de energía en aproximadamente un 0,4-0,5 % por cada grado Celsius adicional.

Por ello, es necesario mejorar su durabilidad y capacidad para operar en condiciones extremas [43].

- Dimensiones y diseño del casco: las embarcaciones requieren estructuras optimizadas para maximizar el área cubierta con paneles solares sin comprometer la estabilidad ni la aerodinámica [34].



Figura 2-9 Tûranor PlanetSolar [44].

2.4.5 Aplicaciones futuras

El desarrollo de plataformas solares autónomas se está orientado hacia:

- Misiones prolongadas: gracias a la mejora en la gestión energética y a los sistemas híbridos que integran energía solar, eólica y almacenamiento.
- Integración con inteligencia artificial: para optimizar rutas, consumo energético y realizar tareas de monitorización avanzada [4] [34].
- Carga de drones aéreos y submarinos: las plataformas solares están diseñándose como puntos móviles de recarga para UAVs y AUVs, extendiendo así la autonomía operativa de sistemas cooperativos [4].

2.5 Estaciones solares para recarga: perspectivas y aplicaciones

Las estaciones solares de recarga han surgido como una alternativa innovadora para mejorar la autonomía de los drones y otros vehículos autónomos [45]. Su diseño combina paneles solares, baterías de almacenamiento y sistemas de gestión energética, proporcionando una solución sostenible para aplicaciones en vigilancia, exploración científica y logística. Este apartado examina las tecnologías actuales, los desafíos asociados con la implementación de estaciones solares y sus perspectivas futuras en la industria de los vehículos autónomos [46].

2.5.1 Perspectiva tecnológica

Las estaciones solares de recarga para UAV han surgido como una solución viable y sostenible en respuesta a la creciente demanda de operaciones autónomas en entornos remotos. Estas estaciones combinan paneles fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento de energía y tecnologías de recarga avanzadas, permitiendo que los UAV realicen misiones prolongadas sin depender de la red eléctrica [29].

1. Componentes clave:

- Paneles solares integrados: diseñados para maximizar la eficiencia energética, los paneles se integran en la estructura de las estaciones para reducir espacio y facilitar el transporte [45].
- Baterías de almacenamiento: acumulan energía para operaciones nocturnas o en días con baja irradiación solar. Estas baterías suelen ser de iones de litio, debido a su alta capacidad y eficiencia [46].
- Sistemas de gestión energética (BMS): optimizan la distribución de la energía almacenada entre los componentes de la estación y los UAV en recarga, priorizando la eficiencia operativa [29].

2. Beneficios de las estaciones solares:

- Sostenibilidad ambiental: al eliminar el uso de combustibles fósiles, estas estaciones reducen significativamente la huella de carbono [30].
- Operación autónoma: las estaciones solares permiten una operación completamente independiente, especialmente útil en áreas donde no hay acceso a infraestructura energética [29].
- Reducción de costos operativos: aunque la inversión inicial puede ser alta, el uso de energía solar elimina costos recurrentes de combustible y mantenimiento [29].

2.5.2 Aplicaciones actuales y futuras

Las estaciones solares se están empleando en diferentes ámbitos para aplicaciones muy diversas como:

- Misiones científicas y de monitorización ambiental las estaciones solares son utilizadas en proyectos de monitoreo de fauna, control de ecosistemas marinos y vigilancia ambiental. Permiten operar UAV durante largas jornadas sin interrupciones [4].
- Operaciones marítimas en combinación con USVs, las estaciones solares proporcionan puntos de recarga móviles en el mar, aumentando la autonomía de los UAV en operaciones de vigilancia costera o patrullaje [4].
- Entrega de paquetes y logística empresas como DJI han diseñado estaciones solares modulares que pueden ser desplegadas en áreas rurales para soportar redes de entrega autónomas, reduciendo la dependencia de redes eléctricas fijas [47].
- Operaciones de rescate y emergencia en escenarios de desastres naturales, las estaciones solares permiten el uso continuo de UAV para evaluar daños y realizar búsquedas sin depender de la infraestructura energética local, que suele estar comprometida [1].

2.5.3 Retos y futuro

A pesar de sus ventajas, las estaciones solares enfrentan desafíos en términos de:

- Eficiencia en condiciones adversas: la limitada irradiación solar en ciertas regiones o climas puede afectar su rendimiento.
- Durabilidad y costos iniciales: el costo de instalación y los materiales resistentes para climas extremos siguen siendo barreras para su adopción masiva.

En el futuro, la integración de inteligencia artificial y sistemas de predicción climática podría mejorar la eficiencia energética y la capacidad de las estaciones solares, consolidándolas como una solución esencial para la autonomía operativa de UAV [29].

2.6 Fundamentos básicos de diseño naval

El diseño naval es un campo multidisciplinar que abarca diversos aspectos fundamentales para garantizar la operatividad, estabilidad y eficiencia de una embarcación. Desde la configuración geométrica del casco hasta la selección del sistema de propulsión, cada elemento juega un papel clave en el rendimiento y seguridad del buque. En este apartado se presentan los principios esenciales del diseño naval, incluyendo el plano de formas, las dimensiones principales, los coeficientes de forma, la estabilidad y las configuraciones avanzadas de cascos, además de los sistemas de propulsión y tipos de hélices empleados en la navegación.

2.6.1 Dimensiones principales

En un barco existen ciertas dimensiones fundamentales que permiten describir sus características básicas. En la Figura 2-10 se pueden observar representadas estas dimensiones principales: la eslora, la manga, el puntal y el calado. A partir de estos parámetros es posible realizar distintos cálculos esenciales, como el volumen, el desplazamiento o los coeficientes de forma, los cuales permiten establecer relaciones entre las distintas proporciones del buque y evaluar su comportamiento hidrodinámico y estructural.

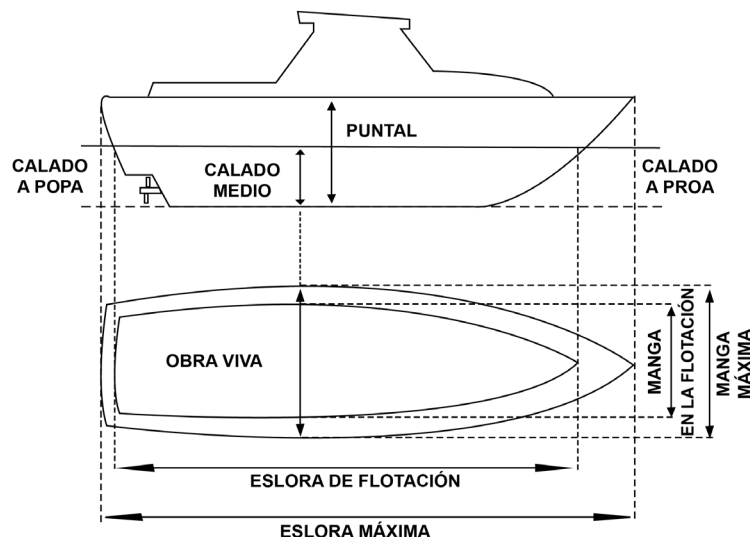


Figura 2-10 Dimensiones principales de un barco [48].

2.6.2 Plano de formas

- El plano de formas de un buque es una representación gráfica que define la geometría del casco mediante un conjunto de líneas que resultan de la intersección del casco con tres grupos de planos paralelos. Estos planos se organizan tomando como referencia tres planos principales orientados según los ejes del sistema de coordenadas: XY, XZ y YZ. Tal y como se muestra en la Figura 2-11 [49].
- TP: plano transversal, perpendicular al eje longitudinal del buque.
- LCP: Plano diametral, que divide el buque en mitades simétricas.
- BLP: plano de línea de base, que actúa como referencia horizontal inferior del casco.

A partir de las intersecciones generadas entre el casco y estas familias de planos, se obtiene un conjunto de puntos que permiten definir con precisión las formas del buque. Estos datos se recogen en un documento que expresa numéricamente las coordenadas necesarias para caracterizar la carena. Este plano es una herramienta fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que sirve de base para las etapas

posteriores al diseño conceptual, como los cálculos hidrostáticos, la optimización del diseño y la construcción del buque [49].

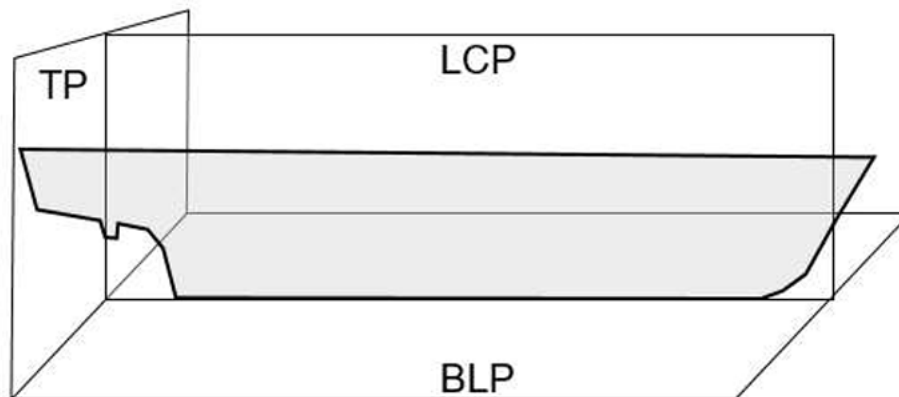


Figura 2-11 Planos principales para definir la geometría de la carena [49].

2.6.3 Coeficientes de forma

Al hablar de herramientas de diseño naval, es imprescindible mencionar los coeficientes de forma del buque constituyen un parámetro esencial en el proceso de diseño [50]. Entre los más relevantes se encuentran los siguientes:

- Coeficiente de bloque: expresa la relación entre el volumen desplazado por el buque y el volumen del paralelepípedo definido por su eslora, manga y calado. Este coeficiente es clave para representar las formas generales del buque.
- Coeficiente de la cuaderna maestra: define la relación entre el área sumergida en la cuaderna maestra, para un calado determinado, y el área del rectángulo que se forma con ese calado y la manga.
- Coeficiente prismático longitudinal: vinculado al comportamiento del buque según su velocidad en los distintos modos de operación para los que ha sido diseñado. Este coeficiente describe cómo se distribuye la flotabilidad a lo largo de la eslora.
- Coeficiente de superficie del plano de agua: relaciona la superficie del plano de agua con el producto de la manga y la eslora del buque.
- Coeficiente volumétrico: establece la relación entre el volumen de desplazamiento y un décimo del cubo de la eslora del buque.

2.6.4 Estabilidad del buque

La estabilidad es uno de los aspectos fundamentales en el diseño y operación de cualquier embarcación, ya que determina su capacidad para resistir inclinaciones provocadas por fuerzas externas como el viento, las olas o las variaciones de carga. La estabilidad de un buque puede dividirse en dos tipos principales: estabilidad transversal, que se refiere al comportamiento frente a escoras laterales, y estabilidad longitudinal, relacionada con los cabeceos de proa a popa [51] [52].

El equilibrio y la estabilidad de un buque es necesario considerar una serie de puntos y parámetros geométricos fundamentales que se muestran en la Figura 2-12:

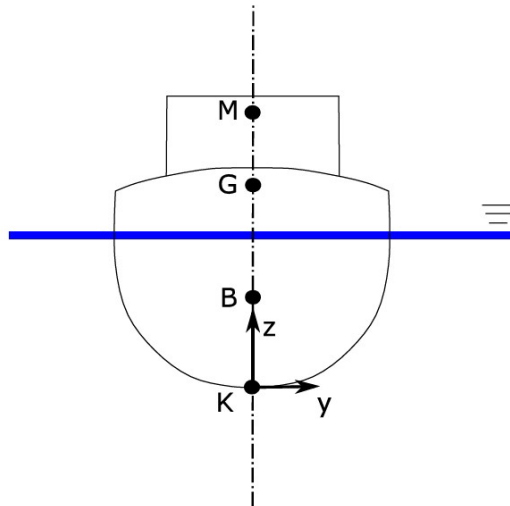


Figura 2-12 Geometría de los puntos relacionados con la estabilidad del buque [49].

- \overline{KB} : distancia vertical desde la quilla hasta el centro de carena (centro de volumen desplazado), que indica la posición del punto donde actúa la fuerza de empuje hidrostática.
- \overline{KG} : distancia desde la quilla hasta el centro de gravedad del buque, directamente relacionada con la distribución de masas a bordo.
- \overline{KM} : distancia desde la quilla hasta el metacentro. El metacentro es el punto geométrico que describe cómo se desplaza el centro de carena al inclinarse el buque y se calcula como la suma de $\overline{KB} + \overline{BM}$, siendo \overline{BM} el radio metacéntrico, ecuación (2-1), dependiente del momento de inercia de la superficie de flotación y del volumen de desplazamiento.

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} \quad (2-1)$$

Donde:

- \overline{BM} es el radio metacéntrico en m.
- I es la inercia en m^4 .
- ∇ es el desplazamiento en m^3 .
- \overline{GM} : distancia entre el centro de gravedad y el metacentro, ecuación (2-2) que es el parámetro clave para evaluar la estabilidad inicial del buque. Un valor positivo indica que el buque tiene capacidad para recuperar su posición tras una escora. Cuanto mayor es el \overline{GM} , mayor será la rigidez del buque ante inclinaciones, aunque valores excesivos pueden generar movimientos bruscos e incómodos. Por el contrario, un \overline{GM} cercano a cero o negativo implica una embarcación inestable, con alto riesgo de vuelco ante perturbaciones.

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (2-2)$$

Donde:

- \overline{GM} es la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro.
- \overline{KM} es la distancia de la quilla al metacentro.
- \overline{KG} es la distancia entre la quilla y el centro de gravedad.
- \overline{KB} es la distancia de la quilla al centro de carena.

En la Figura 2-13 se representan los momentos de adrizamiento para pequeños ángulos de escora, diferenciando entre la estabilidad transversal y la longitudinal. Una de las figuras muestra el

comportamiento transversal del buque, donde se observa cómo, al inclinarse lateralmente, el centro de carena se desplaza generando un brazo de adrizamiento que depende directamente del valor del \overline{GM} transversal. La otra figura representa el caso longitudinal, correspondiente a los movimientos de cabeceo (proa-popa), donde también se indica gráficamente la posición del metacentro longitudinal y su relación con el centro de gravedad y el centro de carena. Ambas representaciones permiten visualizar de manera clara cómo varían los momentos de adrizamiento según el plano de escora considerado y la importancia de mantener una adecuada relación entre los puntos clave de estabilidad del buque para garantizar su comportamiento seguro en navegación.

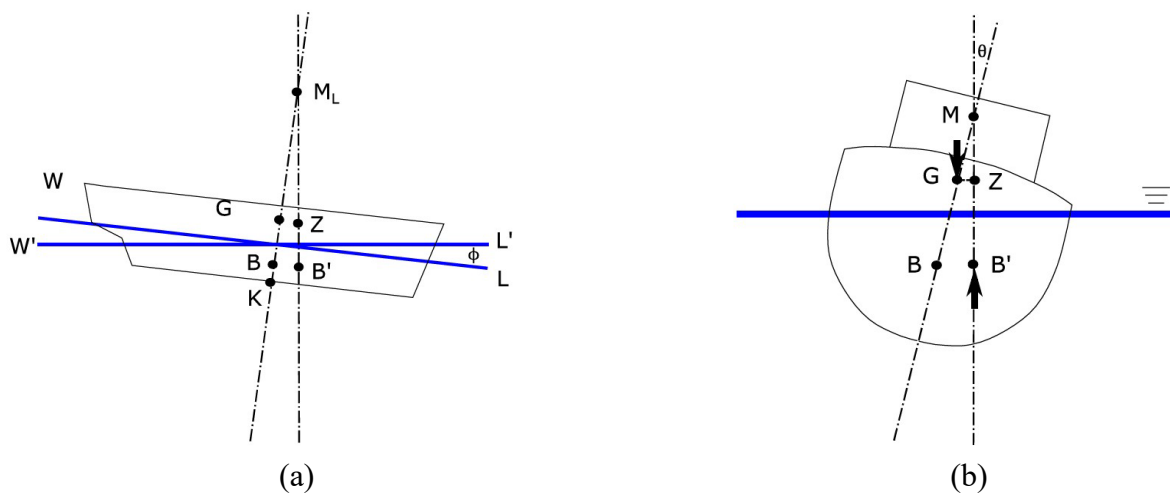


Figura 2-13 Representación esquemática del metacentro.
Metacentro longitudinal (a) y del metacentro transversal (b) [49].

Una relación fundamental en estabilidad es la que existe entre el centro de carena y el centro de gravedad. Para que un buque pueda mantenerse en equilibrio y flotar correctamente, el centro de gravedad (G) debe situarse por debajo del metacentro (M). Esto implica que el valor del centro de gravedad (\overline{KG}) debe ser menor que el del metacentro (\overline{KM}), de modo que se obtenga un valor positivo de \overline{GM} (altura metacéntrica) [51].

El valor de \overline{GM} es determinante para conocer el comportamiento inicial del buque frente a inclinaciones [52]:

- Si $\overline{GM} > 0$, la embarcación es estable. Ante una escora, se genera un par de enderezamiento que tiende a devolver al buque a su posición de equilibrio.
- Si $\overline{GM} = 0$, la embarcación se encuentra en equilibrio indiferente. Esto significa que, si se escora, no aparece ninguna fuerza que la devuelva a su posición inicial, pero tampoco que aumente la escora por sí misma. El buque permanecería inclinado en la nueva posición alcanzada si no se aplican fuerzas adicionales.
- Si $\overline{GM} < 0$, la embarcación es inestable. Cualquier escora tenderá a incrementarse por sí sola, y el buque acabará volcando si no se corrige la situación.

Por tanto, si el centro de gravedad se encuentra demasiado alto (es decir, si \overline{KG} es elevado), disminuye la estabilidad y aumenta el riesgo de escora o vuelco, ya que la fuerza de empuje hidrostática no puede generar el par de enderezamiento necesario para devolver el buque a su posición de equilibrio. Esto hace que, en el diseño del buque, sea fundamental garantizar una distribución de pesos que mantenga el centro de gravedad lo más bajo posible, asegurando así un \overline{GM} positivo y una estabilidad adecuada [52].

Un \overline{GM} elevado proporciona mayor estabilidad, pero puede provocar movimientos bruscos y poco confortables debido a períodos de balance muy cortos. En cambio, un \overline{GM} bajo mejora el confort al suavizar los balances, aunque compromete la seguridad del buque, especialmente bajo condiciones meteorológicas adversas [52].

En particular, el análisis de estabilidad es especialmente relevante para embarcaciones como los catamaranes, donde las diferencias geométricas frente a monocascos permiten obtener valores de \overline{GM} transversal muy superiores, gracias a la mayor separación entre cascos y al incremento del momento de inercia transversal, sin que esto afecte al \overline{GM} longitudinal, que permanece similar en ambas configuraciones debido a la misma eslora y volumen desplazado [53].

En resumen, la estabilidad es un aspecto fundamental en el diseño de cualquier embarcación, ya que de ella depende su capacidad para mantener el equilibrio frente a las distintas fuerzas que actúan durante la navegación. Garantizar una buena estabilidad es clave para la seguridad del buque y para asegurar un comportamiento adecuado tanto en condiciones normales como en situaciones adversas. Además, una embarcación estable no solo mejora la seguridad, sino también el confort a bordo, evitando movimientos bruscos y reduciendo el riesgo de vuelco. Por este motivo, el estudio de la estabilidad, tanto transversal como longitudinal, resulta imprescindible a la hora de comparar distintas configuraciones de cascos y valorar cuál es la más adecuada según las necesidades operativas de la plataforma.

2.6.5 Vehículos marinos y configuraciones avanzadas

En el diseño naval, las embarcaciones pueden clasificarse según la configuración de su casco y su principio de funcionamiento. Existen desde diseños tradicionales hasta configuraciones avanzadas que optimizan la estabilidad, la resistencia y la velocidad.

2.6.5.1 Monocasco

El diseño más común en la industria naval, con una única estructura flotante. Se divide en:

- Casco de desplazamiento: optimizado para estabilidad y eficiencia a bajas velocidades. Utilizado en buques de carga y navíos de guerra [54].
- Casco de semi-desplazamiento: equilibrio entre velocidad y estabilidad, usado en patrulleras y yates [54].
- Casco de planeo: diseñado para altas velocidades, basado en la sustentación hidrodinámica. Común en lanchas rápidas y embarcaciones militares [54].

2.6.5.2 Multicasco

Incorpora múltiples cascos para mejorar estabilidad y reducir resistencia:

- Catamarán: dos cascos paralelos, mayor estabilidad y menor arrastre [55].
- Trimarán: tres cascos, combina velocidad y estabilidad [56].
- Pentamarán: cinco cascos, diseño experimental para alta eficiencia [57].

2.6.5.3 SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull)

Variante del catamarán con cascos sumergidos que minimizan la influencia de las olas, ideal para mares agitados y buques de investigación [58].

2.6.5.4 Hydrofoil y cascos sumergidos

- *Hydrofoil*: usa alas sumergidas para elevar el casco, reduciendo la fricción con el agua [59].
- *Deeply Submerged Hull*: minimiza la resistencia mediante la inmersión de la proa [59].
- *Surface Piercing Hull*: diseñado para atravesar el agua con mínima resistencia [59].

2.6.5.5 Vehículos de soporte por aire

- ACV (*Hovercraft*): se desliza sobre un colchón de aire, útil en múltiples terrenos [59].
- SES (*Surface Effect Ship*): combina flotación aerodinámica e hidrodinámica para reducir resistencia [59].
- WIG (*Wing In Ground Effect*): usa alas para generar sustentación cerca de la superficie del agua, mejorando eficiencia a altas velocidades [59].

En la Figura 2-14 se resume los principales tipos de cascos y configuraciones utilizadas en la ingeniería naval, desde los diseños tradicionales hasta las innovaciones más avanzadas.

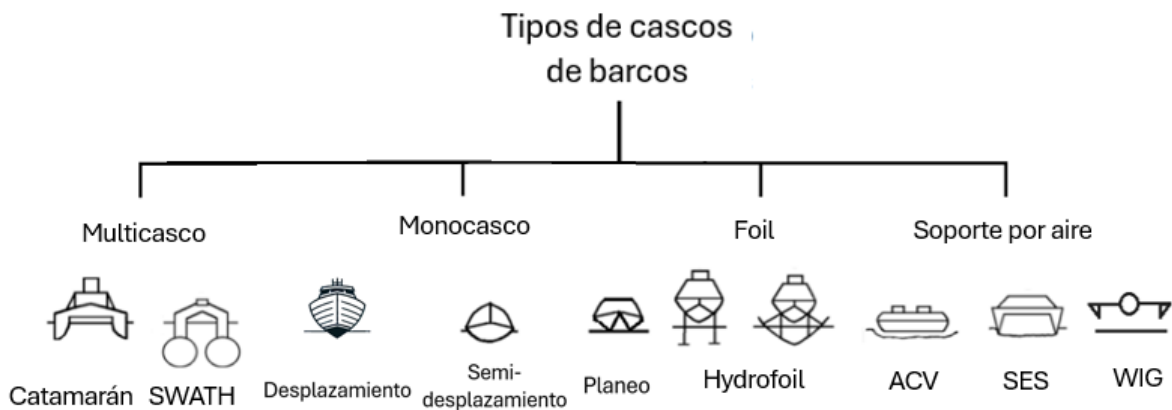


Figura 2-14 Tipos de cascos

2.6.6 Tipos de motores en propulsión marina

En los sistemas de propulsión marina, los motores desempeñan un papel fundamental al transformar la energía proveniente del combustible o la electricidad en movimiento, lo que permite impulsar la hélice y, por tanto, desplazar la embarcación. Tradicionalmente, los motores diésel han sido los más empleados debido a su capacidad para proporcionar altos niveles de potencia y autonomía en largas travesías, consolidándose como la opción predominante en buques mercantes, pesqueros y militares. No obstante, el creciente interés por soluciones más sostenibles y eficientes ha impulsado el desarrollo de alternativas eléctricas, especialmente adecuadas para embarcaciones que requieren un control preciso de velocidad, menores emisiones y una reducción significativa del nivel de ruido [60].

Entre los motores más utilizados destacan el motor diésel, que destaca por su fiabilidad y operatividad prolongada; el motor de corriente continua (DC), que permite un control preciso de velocidad y maniobras, aunque con limitaciones en potencia y mayores necesidades de mantenimiento debido al desgaste de sus componentes; el motor de inducción (IM), ampliamente implementado por su sencillez de diseño y fiabilidad operativa, aunque con un control de velocidad menos preciso [61]; y el motor síncrono (SM), empleado en aplicaciones de alta potencia que requieren una velocidad constante, resultando especialmente útil en sistemas avanzados como la propulsión tipo POD gracias a su integración directa con sistemas eléctricos [62]. En la Figura 2-15 se representan los distintos tipos de motores utilizados en sistemas de propulsión marina previamente descritos.

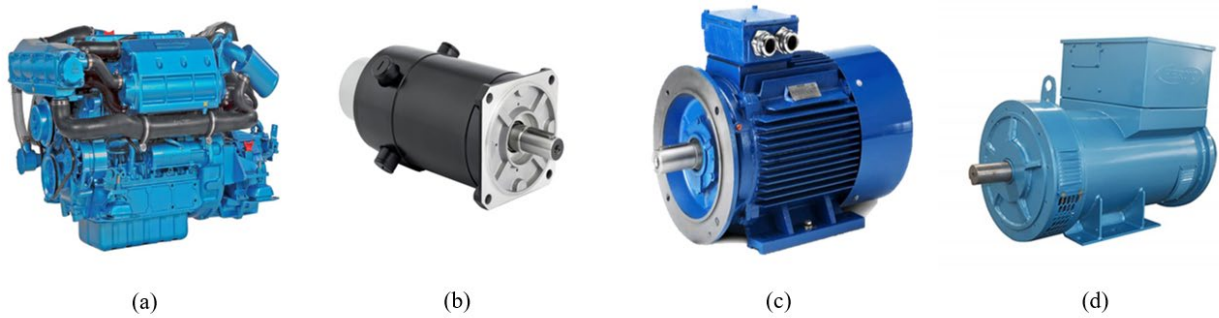


Figura 2-15: Tipos de motores en propulsión marina.

Motor diésel (a), motor de corriente continua (b), motor de inducción (c), motor síncrono (d).

2.6.7 Tipos de hélices en propulsión marina

La hélice es el componente encargado de transformar la energía generada por el motor en empuje, permitiendo así el desplazamiento del buque a través del agua. La elección del tipo de hélice depende de diversos factores, como las características de la embarcación, las condiciones de operación y los requerimientos específicos de maniobrabilidad y velocidad. Dentro de las hélices convencionales destaca la hélice de paso fijo (FPP), caracterizada por mantener un ángulo constante en sus palas durante toda la navegación, lo que la convierte en una solución robusta y adecuada para buques que operan en condiciones estables y a velocidades constantes. Por su parte, la hélice de paso controlable (CPP) permite modificar el ángulo de ataque de las palas durante la operación, adaptándose a las distintas exigencias de navegación y mejorando la maniobrabilidad y eficiencia energética en embarcaciones como remolcadores y ferris [62] [60].

En cuanto a las hélices especiales, la hélice supercavitante está diseñada para alcanzar altas velocidades mediante la formación controlada de cavitación, reduciendo la resistencia hidrodinámica y permitiendo un desplazamiento más eficiente en embarcaciones ligeras o de operaciones especiales [63]. Por otro lado, la hélice de efecto Magnus, utilizada en sistemas como el Voith-Schneider, genera empuje mediante cilindros verticales giratorios, proporcionando al buque una maniobrabilidad excepcional y permitiendo movimientos precisos en espacios reducidos, lo que resulta ideal para operaciones portuarias [64]. Finalmente, los sistemas integrados de propulsión, como los POD, incorporan una cápsula externa al casco que integra el motor eléctrico y acciona directamente la hélice, permitiendo su rotación de 360°, lo que optimiza tanto la maniobrabilidad como la eficiencia energética del buque, además de reducir significativamente las vibraciones y los niveles de ruido [62]. Algunos modelos comentados anteriormente se muestran en la Figura 2-16.

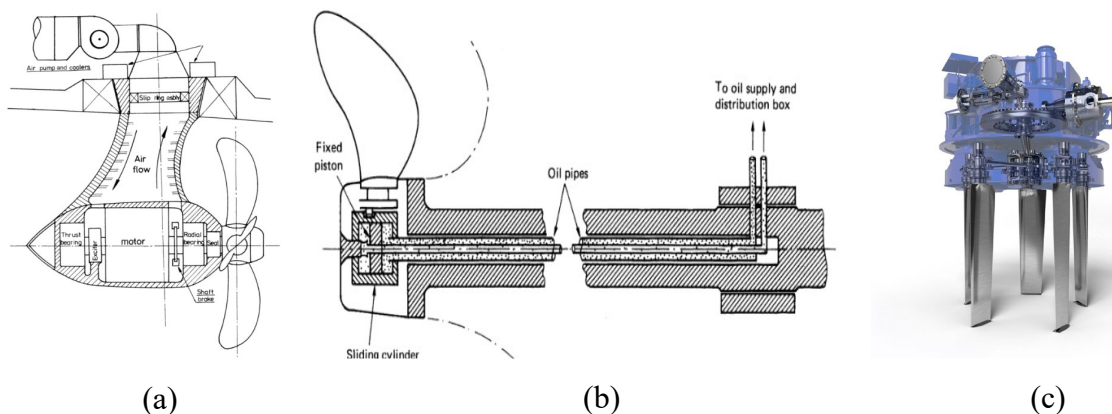


Figura 2-16 Modelos de hélices.

POD (a), hélice de paso variable (b), Voith-Schneider (C).

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Perfil de misión

En este apartado se detalla el uso previsto de la plataforma naval para la recarga de drones, considerando su despliegue, el tipo de misiones a realizar y los requerimientos operacionales.

3.1.1 Despliegue de la plataforma

El primer aspecto que estudiar es el punto de despliegue de la plataforma. Esta ha sido diseñada para ser lanzada desde un buque con dique, como los buques anfibios de la clase Galicia, el Galicia y el Castilla, así como el buque de proyección estratégica Juan Carlos I, dado que sus dimensiones superan los límites que permitirían su despliegue seguro mediante los pescantes de las fragatas. Además, su almacenamiento dentro de una fragata no es viable. Por este motivo, la plataforma se orienta principalmente hacia operaciones anfibas, un componente clave dentro de nuestra flota.

Otra opción que considerar es su despliegue desde un buque de aprovisionamiento, cuyas grúas están preparadas para manipular cargas de mayores dimensiones. Este aspecto amplía la versatilidad operativa de la plataforma y ofrece diferentes opciones logísticas en función del escenario de la misión.

Una vez desplegada, se traslada de forma autónoma a la zona de operación siguiendo rutas preprogramadas. Su baja velocidad no compromete la misión, dado que su función no es intervenir directamente, sino ofrecer apoyo logístico a drones UAV.

3.1.2 Tipo de Misión

Una vez determinado el buque de despliegue, se debe analizar el tipo de misión a desarrollar. La plataforma ha sido concebida para operar con dos drones UAVs. Su objetivo es ampliar el rango visual y extender la autonomía operativa de los drones UAV mediante su sistema de recarga. Existen dos enfoques principales para su empleo:

- Despliegue de reconocimiento: en esta configuración, la plataforma es enviada con antelación para que los drones realicen un estudio de la zona de interés sin la presencia visible de un buque, evitando así generar alertas.
- Despliegue simultáneo a la fuerza anfibia: en este escenario, el buque se encuentra más cerca de la playa para acelerar el desembarco. La plataforma se emplea en paralelo con el desembarco de las fuerzas, permitiendo la monitorización en tiempo real tanto del entorno marítimo como terrestre y mejorando la capacidad de reconocimiento de la operación.

3.1.3 Movimientos Operacionales

En ambos tipos de misión se contemplan dos modos de movimiento diferenciados: tránsito y operación en zona, cuyas características varían en función del perfil táctico específico. A continuación, se describe el comportamiento esperado de la plataforma para cada uno de los escenarios contemplados:

3.1.3.1 Despliegue de reconocimiento:

En este escenario, la plataforma se desplazará de forma autónoma hasta la zona designada para la operación, sin requerir asistencia directa del buque nodriza. La distancia de tránsito estimada se sitúa entre 20 y 25 millas náuticas (MN), permitiendo que el buque permanezca fuera del rango visual, evitando así comprometer el factor sorpresa y reduciendo la probabilidad de detección durante el despliegue.

Una vez alcanzada la zona operativa, la plataforma deberá permanecer dentro de un radio operativo de 3 MN, limitando su movimiento únicamente en caso de que se exceda dicho umbral. Esta estrategia tiene como objetivo minimizar el uso de los motores y, por ende, optimizar el consumo energético durante la fase de permanencia.

3.1.3.2 Despliegue simultáneo con la fuerza anfibia:

En este escenario, la plataforma se posicionará en una zona más próxima a la costa con el objetivo de agilizar las operaciones de desembarco. Como resultado, la distancia de tránsito desde el punto de fondeo hasta el área de operación se verá reducida respecto al caso anterior, situándose en aproximadamente 10 MN.

Adicionalmente, con el fin de evitar interferencias durante las maniobras de desembarco anfibio y garantizar que la plataforma no represente un obstáculo para medios como las embarcaciones de asalto (EMBAS) o las lanchas de desembarco tipo LCM (*Landing Craft Mechanized*), se ha decidido establecer un radio operativo limitado a 1,5 MN en este entorno. Esta restricción permitirá mantener una zona segura y despejada para las operaciones tácticas, asegurando la compatibilidad de la plataforma con el desarrollo fluido de la misión.

Cabe destacar que el consumo energético en ambas fases estará condicionado por factores ambientales, como la velocidad del viento y la intensidad de las corrientes marinas presentes en el área de operación, los cuales podrían afectar la capacidad de la plataforma para mantener su posición de forma eficiente.

3.1.4 Consumo Energético de los Motores

El análisis del consumo energético se basa en los siguientes supuestos:

- Durante el tránsito, la plataforma operará a una velocidad de 5 nudos, lo que supone un tiempo estimado de 5 horas de operación para los motores en la fase de despliegue de reconocimiento, que representa la situación de tránsito con mayor demanda energética.
- En la fase de mantenimiento dentro del radio de seguridad, se considera una deriva de 1.5 nudos debido a la acción del viento y las corrientes. Se asume la situación de despliegue simultáneo con la fuerza, ya que es la más exigente dentro de la zona operacional. Para corregir la deriva y mantener la posición, se estima que el motor deberá activarse 24 veces al día, una vez por hora, con una velocidad de crucero de 5 nudos.

3.1.5 Uso de los Drones

Durante la fase de operación, se prevé que solo un UAV se mantenga en vuelo de forma continua, garantizando una vigilancia o supervisión constante en la zona de misión. Para ello, se desplegarán dos drones, de los cuales uno permanecerá en vuelo mientras el otro se encontrará en proceso de recarga o en espera como unidad de reserva, listo para operar en cuanto sea necesario.

Cada misión se organiza en ciclos de 45 minutos de vuelo, seguidos de 60 minutos de recarga. El tiempo estimado para el intercambio de batería es de aproximadamente 80 segundos, lo que permite realizar el relevo del dron de forma rápida y eficiente, sin interrupciones en la operación.

Asimismo, se contempla la instalación de dos estaciones automáticas de intercambio de baterías, que funcionarán de manera continua para asegurar la disponibilidad operativa del sistema. Esta disposición permite mantener la autonomía y asegurar el reemplazo inmediato del dron en caso de necesidad, sin comprometer la continuidad de la misión.

3.1.6 Autonomía de la Plataforma

La plataforma ha sido diseñada para operar de forma completamente autónoma durante un período inicial de tres días, contando para ello con el respaldo energético de las baterías integradas, que se prevé desplegar totalmente cargadas. Esta duración coincide con el estándar operativo de una misión anfibia convencional.

Adicionalmente, se ha incorporado un sistema de captación solar como solución estratégica para extender la autonomía en caso de que la operación se prolongue más allá de ese plazo. Gracias a este sistema híbrido de almacenamiento y generación, la plataforma puede mantener su operatividad sin necesidad de intervención humana, adaptándose dinámicamente a las necesidades de la misión y al entorno.

3.1.7 Conclusión

El análisis del perfil de misión ha permitido establecer un marco operativo coherente para el diseño de la plataforma, definiendo sus requisitos energéticos, logísticos y funcionales en el contexto de operaciones anfibas. La capacidad de operar de forma autónoma durante al menos tres días, junto con la posibilidad de extender su autonomía mediante generación solar, asegura su adaptabilidad a distintos escenarios tácticos.

Asimismo, se han considerado las condiciones más exigentes en cada fase (tránsito, zona de operación y soporte a UAV) para anticipar las demandas críticas del sistema energético y estructural. Su flexibilidad de despliegue, unida a su capacidad para multiplicar la autonomía operativa de los drones, la convierten en un activo estratégico de alto valor para la Armada.

Este planteamiento constituye la base sobre la que se desarrollará, en los capítulos siguientes, el diseño detallado de la plataforma y la validación de su viabilidad técnica y operativa.

3.2 Tipo de plataforma naval

Como se explicó en el apartado de Vehículos marinos y configuraciones avanzadas, en el diseño de embarcaciones existen diversas configuraciones estructurales que pueden adoptarse en función de los requisitos operativos y de estabilidad. Para el desarrollo de esta plataforma, se ha optado por un diseño en configuración de catamarán, debido a las ventajas que ofrece en términos de estabilidad y comportamiento hidrodinámico.

Los cascos gemelos del catamarán proporcionan un equilibrio superior en comparación con estructuras monocasco, reduciendo la escora y mejorando la seguridad en condiciones adversas. De hecho, esta configuración se encuentra entre las más estables, junto con el diseño SWATH, lo que garantiza una plataforma robusta y adecuada para su propósito.

Además, en el Anexo III: Análisis de la estabilidad, se presentan de manera numérica las diferencias de estabilidad entre un monocasco y un catamarán, permitiendo visualizar y comparar el comportamiento de ambas configuraciones en distintos escenarios operativos. El estudio demuestra que el catamarán ofrece una estabilidad significativamente superior en comparación con el monocasco, además de proporcionar mayor espacio utilizable, lo que resulta ventajoso para la integración de equipos y sistemas a bordo.

3.3 Dimensiones de la plataforma

Para determinar la cantidad de baterías y paneles solares necesarias en este proyecto, se ha realizado un análisis previo de la resistencia viscosa. Este estudio permite estimar el consumo energético de los motores y, con ello, definir las dimensiones óptimas de la plataforma.

Para ello, se ha creado una base de datos en Excel con información de buques con configuración de catamarán, la cual se encuentra disponible en el Anexo IV: Base de datos de catamaranes. Esta base de datos proporciona una amplia variedad de opciones que permiten establecer unas dimensiones iniciales aproximadas para el diseño de la plataforma.

Además de las dimensiones de estos buques, es fundamental considerar sus características principales, ya que influyen en el rendimiento y viabilidad del proyecto. Este proceso de dimensionamiento representa una de las tareas clave en las fases iniciales del desarrollo de una nueva embarcación.

3.3.1 Juego de dimensiones

Dado que la manga es uno de los factores más limitantes en el diseño y, además, influye directamente en la superficie disponible para la instalación de paneles solares, se ha priorizado su selección como parámetro de referencia. De este modo, se podrá colocar paneles solares estándar de manera perpendicular a la crujía de la plataforma, optimizando la captación de energía solar.

A partir de la base de datos y las relaciones obtenidas, se determinarán los valores de eslora y calado, ajustando estos parámetros en función de las tendencias observadas en los catamaranes analizados.

Sin embargo, el desplazamiento será estimado de manera independiente, ya que los valores obtenidos de la base de datos presentan diferencias significativas con respecto a las estimaciones teóricas para este tipo de plataforma. Por lo tanto, se llevará a cabo un ajuste basado en la experiencia y los requerimientos específicos del proyecto.

3.3.1.1 Eslora

Utilizando la ecuación de la Figura 3-1 para poder calcular la eslora en función de la manga se saca la ecuación (3-1).

$$L = 1,5764 \cdot B + 6,4114 \quad (3-1)$$

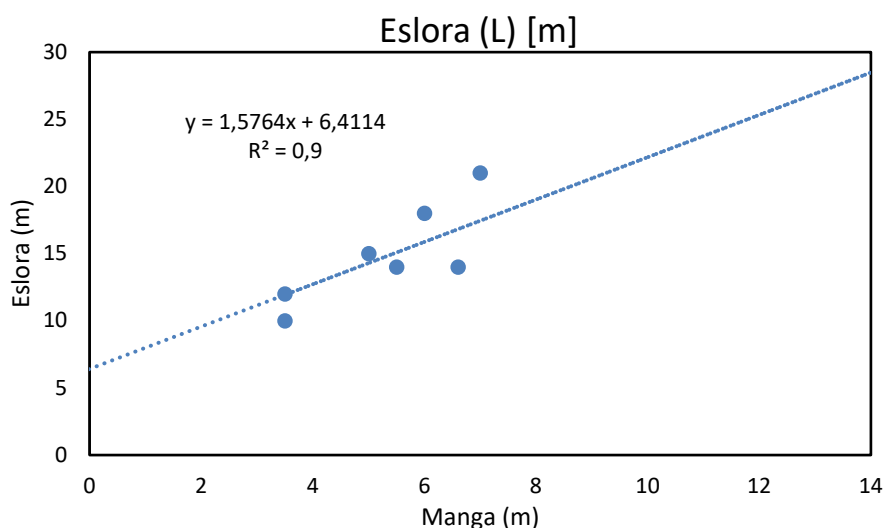


Figura 3-1 Eslora en función de la manga.

Donde:

- L es la eslora en m

- B es la manga en m

3.3.1.2 Calado

Realizando el mismo proceso, del Figura 3-2 se obtiene la ecuación (3-2) para el calado en función de la manga.

$$T = 0,1206 \cdot B + 0,2122 \quad (3-2)$$

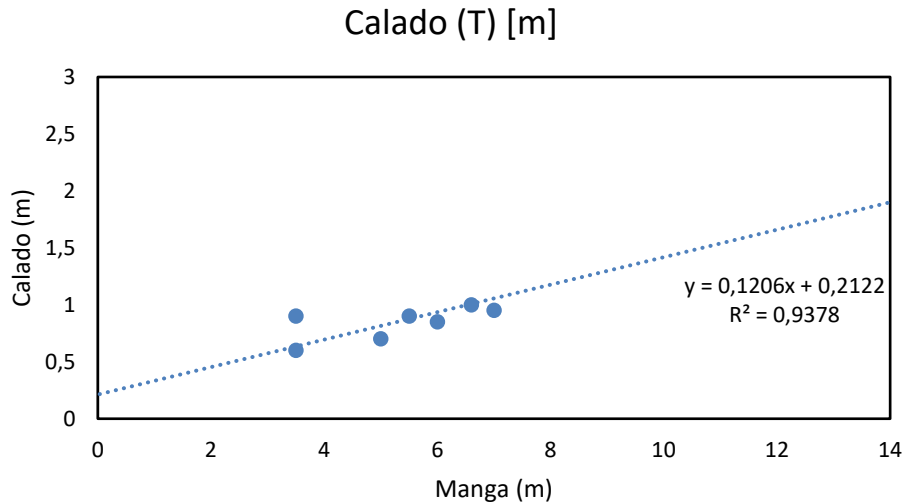


Figura 3-2 Calado en función de la manga.

Donde:

- T : es el calado en m

3.3.1.3 Desplazamiento

El peso máximo estimado que puede soportar la plataforma, considerando las limitaciones de espacio y la distribución de los distintos componentes, es de aproximadamente 4,74 toneladas, según se detalla en la Tabla 3-1. Este valor incluye el peso conjunto de las baterías, los paneles solares y el casco de fibra de vidrio del catamarán, considerando tanto el mayor número posible de unidades como los pesos máximos de cada elemento.

El desplazamiento total de la plataforma se ha calculado de manera aproximada mediante cálculos estimativos, redondeando hacia arriba y considerando los datos recogidos en la Tabla 3-1, que recoge los valores máximos de peso que podrían instalarse en la plataforma bajo el escenario más desfavorable.

No obstante, con el objetivo de incorporar un margen de seguridad y simplificar los cálculos de resistencia al avance, se adopta un peso total de 6 toneladas como valor de referencia para dichos análisis. Esta aproximación permite contemplar posibles incrementos de peso derivados de futuras modificaciones, integración de nuevos equipos o variaciones en la distribución de la carga, sin comprometer la fiabilidad ni la seguridad del diseño final de la plataforma.

Componente	Unidades	Peso individual (kg)	Peso total (kg)
Baterías	28	100,0	2800
Placas solares	28	23,5	658
Casco de fibra de vidrio	-	-	1200
Peso total estimado	-	-	4658

Tabla 3-1 Peso total máximo estimado.

3.3.1.4 Distancia entre cascos

Es fundamental, en el diseño de un catamarán, establecer correctamente la distancia entre los cascos y la manga que quedará sumergida en el agua. Para ello, se debe cumplir la siguiente condición entre la relación separación de casco y la eslora $0,2 < \frac{s}{L} < 0,4$. En este caso, se ha decidido que la separación entre los cascos será de 4 metros y que cada casco tendrá un ancho de 0,6 metros debajo del agua.

Para comprobar que la distancia entre cascos además se ha hecho un estudio hidrodinámico con Autodesk CFD que se encuentra en el Anexo V: Estudio CFD.

3.3.1.5 Características básicas de la plataforma

Por lo tanto, los valores estimados para la realización del cálculo de la resistencia viscosa serán los mostrados en la siguiente Tabla 3-2.

Propiedad	Símbolo	Valor	Propiedad	Símbolo	Valor
Eslora (m)	<i>L</i>	14,0	Separación entre barcos (m)	<i>s</i>	3,8
Manga (m)	<i>B</i>	5,0	Manga bajo el agua (m)	<i>b</i>	1,2
Calado (m)	<i>T</i>	0,8	Puntal (m)	<i>P</i>	1,5
Desplazamiento (ton)	<i>Δ</i>	6,0	Velocidad (nudos)	<i>V</i>	5,0

Tabla 3-2 Características básicas de la plataforma.

3.3.2 Coeficientes

A partir de los datos iniciales, se pueden calcular los distintos coeficientes de forma del buque, los cuales son fundamentales para el análisis hidrodinámico.

3.3.2.1 Coeficiente de bloque

El coeficiente de bloque (C_b), que se calcula con la ecuación (3-3), representa la relación entre el volumen sumergido de la embarcación y el paralelepípedo que lo encierra.

$$C_b = \frac{\Delta}{b \cdot L \cdot T} \quad (3-3)$$

Donde:

- C_b es el coeficiente de bloque.
- b : es la manga debajo del agua en m.
- L : es la eslora en m.
- T : es el calado en m.
- Δ : es el desplazamiento en t.

De esta forma:

$$C_b = \frac{6}{1,2 \cdot 14 \cdot 0,8} = 0,436$$

3.3.2.2 Número de Froude

El número de Froude (Fn), que se calcula con la ecuación (3-4), se utiliza para caracterizar el régimen de navegación de la embarcación.

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (3-4)$$

Donde:

- Fn : es el número de Froude.
- g : es la gravedad 9,81 m/s².
- V : es la velocidad en m/s

Siendo:

$$Fn = \frac{2,572}{\sqrt{9,81 \cdot 14}} = 0,219$$

3.3.2.3 Coeficiente de la Sección Maestra

El coeficiente de la sección maestra (C_m), que se calcula con la ecuación (3-5), se calcula con la expresión empírica:

$$C_m = 0,75 + (1 - Fn)^4 \quad (3-5)$$

Donde:

- C_m : es el coeficiente de la maestra. Siendo en este caso:

$$C_m = 1 - 2 \cdot (0,219)^4 = 0,995$$

3.3.2.4 Coeficiente Prismático

El coeficiente prismático (C_p), que se calcula con la ecuación (3-6), se obtiene a partir de la relación entre el coeficiente de bloque y el coeficiente de la sección maestra.

$$C_p = \frac{C_b}{C_m} \quad (3-6)$$

Donde:

- C_p : es el coeficiente prismático. Siendo:

$$C_p = \frac{0,436}{0,995} = 0,438$$

3.3.2.5 Cálculo de la Superficie Mojada

En esta sección se calcula la superficie mojada del casco (S_m), que corresponde a la superficie del casco que permanece sumergida durante la navegación y que influye directamente en la resistencia al avance de la plataforma. Para su estimación, se han empleado dos expresiones ampliamente utilizadas en el ámbito naval: la ecuación de Denny, ecuación (3-7), y la ecuación de Taylor, ecuación (3-8) [65].

La ecuación de Denny permite obtener la superficie mojada a partir de las dimensiones principales del casco y el desplazamiento.

$$S_m = 1,7 \cdot L \cdot T + \frac{\nabla}{T} \quad (3-7)$$

Donde:

- S_m : es la superficie mojada del casco en m^2 .
- ∇ : es el desplazamiento en m^3 .

Siendo:

$$S_m = 1,7 \cdot 14 \cdot 0,8 + \frac{5,854}{0,8} = 26,357 \text{ m}^2$$

Por otro lado, la ecuación de Taylor permite también obtener una estimación de la superficie mojada considerando el desplazamiento y la eslora.

$$S_m = 2,64\sqrt{\nabla \cdot L} \quad (3-8)$$

De esta manera la superficie mojada usando la ecuación (3-8) sería

$$S_m = 2,64\sqrt{5,854 \cdot 14} = 23,899 \text{ m}^2$$

Dado que ambas expresiones son aceptadas en la práctica y cada una considera diferentes aspectos geométricos y de volumen del casco, se procede a obtener un valor medio entre ambas estimaciones con el fin de adoptar una referencia equilibrada para el diseño. Así, la superficie mojada promedio se calcula como:

$$S_m = \frac{26,357 + 23,899}{2} = 25,128 \text{ m}^2$$

Este valor medio de $25,128 \text{ m}^2$ será el considerado para los cálculos posteriores relacionados con la resistencia al avance y el dimensionamiento del sistema de propulsión.

3.3.3 Estudio de potencia

Para obtener una estimación de la potencia requerida, se ha utilizado el método de Holtrop, el cual permite calcular la resistencia total al avance (R_t). Este método se basa en una serie de simplificaciones que facilitan el análisis hidrodinámico de la embarcación.

Todas las ecuaciones empleadas para el cálculo de la resistencia han sido tomadas del estándar ITTC-57 [66].

3.3.3.1 Cálculo de la Resistencia Total

La resistencia total (R_t), ecuación (3-9), al avance se expresa como la suma de varios componentes:

$$R_t = R_v + R_{ap} + R_w + R_b + R_{tr} + R_a \quad (3-9)$$

Donde:

- R_t : resistencia total en W.
- R_v : resistencia viscosa en W.
- R_{ap} : resistencia de los apéndices en W.
- R_w : resistencia por formación de olas en W.
- R_b : resistencia de presión por el bulbo en W.
- R_{tr} : resistencia de presión de las popas de estampa cuando están sumergidas en W.
- R_a : resistencia debida al coeficiente de correlación modelo-buque (Ca) en W.

En el diseño de la plataforma, se han considerado las diferentes resistencias al avance que pueden afectar al comportamiento del casco. Sin embargo, debido a las características particulares del diseño, algunas de estas resistencias se han despreciado por los motivos que se detallan a continuación:

- Resistencia de los apéndices (R_{ap}): al no contar la plataforma con aletas estabilizadoras y siendo el timón el único apéndice presente, ubicado en popa, se considera que su contribución a la resistencia total es despreciable.
- Resistencia por el bulbo (R_b): dado que el diseño no incluye un bulbo de proa, esta componente de la resistencia se anula.
- Resistencia de presión de las popas de estampa cuando están sumergidas (R_{tr}): en este caso, el espejo de popa no estará sumergido, por lo que su efecto en la resistencia al avance también se considera despreciable.
- Resistencia debida al coeficiente de correlación modelo-buque (R_a): al encontrarnos en la fase de diseño conceptual, no se tendrá en cuenta la resistencia adicional generada por el modelo a escala.
- Resistencia por formación de olas (R_w): dado que la resistencia viscosa será considerablemente superior a la generada por la formación de olas, se adopta una simplificación comúnmente aceptada en etapas preliminares de diseño. Se considera que la resistencia por olas representa aproximadamente un 20 % de la resistencia viscosa, tal como se expresa en la ecuación (3-10).

$$R_w = 0,2 \cdot R_v \quad (3-10)$$

Con todas las simplificaciones anteriormente descritas, la expresión final para la resistencia total (R_T) de la plataforma se reduce a la ecuación (3-11).

$$R_t = 1,2 \cdot R_v \quad (3-11)$$

De este modo, se obtiene una formulación simplificada para el cálculo de la resistencia total al avance de la plataforma durante esta fase conceptual, permitiendo centrarse en la resistencia viscosa como componente predominante del análisis.

3.3.3.2 Numero de Reynolds

El número de Reynolds (Re) se define con la ecuación (3-12).

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3-12)$$

Donde:

- Re : es el número de Reynolds.
- V : es la velocidad en m/s.
- L : es la eslora en m.
- ν : es viscosidad agua mar $1,19 \cdot 10^{-6}$.

Siendo:

$$Re = \frac{2,572 \cdot 14}{1,19 \cdot 10^{-6}} = 30261438$$

3.3.3.3 Coeficiente de Fricción

Una vez obtenido el número de Reynolds, el coeficiente de fricción se calcula mediante la ecuación (3-13) del ITTC-1957:

$$C_f = \frac{0,75}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (3-13)$$

Donde:

- C_f : es el coeficiente de fricción.

Siendo:

$$C_f = \frac{0,75}{(\log_{10} 30261438 - 2)^2} = 0,00250$$

3.3.3.4 Coeficiente de forma

El coeficiente de forma $(1 + k1)$ se obtiene a partir de la ecuación (3-14).

$$(1 + k1) = 0,93 + 0,487118 \cdot \left(\frac{b}{L}\right)^{1,06806} \cdot \left(\frac{T}{L}\right)^{0,46106} \cdot \left(\frac{L}{Lr}\right)^{0,0121563} \cdot \left(\frac{L^3}{\nabla}\right)^{0,36486} \cdot (1 - C_p)^{-0,604247} \quad (3-14)$$

Donde:

- $(1+k1)$: es el coeficiente de forma del casco.
- Lr : es la eslora entre perpendiculares (igual a L).

Siendo:

$$(1 + k1) = 1,056$$

3.3.3.5 Resistencia viscosa

Con los coeficientes obtenidos, la resistencia viscosa se obtiene de la ecuación (3-15).

$$Rv = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_m \cdot C_f \cdot (1 + k1) \quad (3-15)$$

Donde:

- ρ : es la densidad del agua salada 1025 kg/m^3 .
- S_m : es la superficie mojada en m^2 .
- C_f : es el coeficiente de fricción.

Siendo:

$$Rv = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 2,572^2 \cdot 25,128 \cdot 0,00250 \cdot 1,056 = 224,651 \text{ N}$$

3.3.3.6 Resistencia total

Como se explicó en la ecuación (3-11) la resistencia total será:

$$Rt = 1,2 \cdot 224,651 = 269,582 \text{ N}$$

3.3.3.7 Potencia necesaria

La potencia necesaria (P) se calcula con la ecuación (3-16).

$$P = Rt \cdot V \tag{3-16}$$

Donde:

- P : es la potencia necesaria en W.

Siendo:

$$P = 269,582 \cdot 2,572 = 693,424 \text{ W}$$

3.3.3.8 Potencia efectiva

Para calcular la potencia efectiva (P_e), que se calcula con la ecuación (3-17), se debe considerar el rendimiento del sistema propulsivo, estimado en 60 %.

$$P_e = \frac{P}{\eta} \tag{3-17}$$

Donde:

- P_e : es la potencia efectiva en W.
- η : es el rendimiento de 0,6.

Siendo:

$$P_e = \frac{693,424}{0,6} = 1155,706 \text{ W} = 1,156 \text{ kW}$$

3.3.4 Valores obtenidos

Por lo tanto, obtenemos que la potencia necesaria es de 1,156 kW, la cual sería la requerida para propulsar la plataforma tipo catamarán a una velocidad de 5 nudos bajo las condiciones establecidas. Además, con los coeficientes obtenidos y el estudio CFD realizado, se puede deducir que las dimensiones definidas para la plataforma son adecuadas en esta fase conceptual. Sin embargo, será necesario realizar análisis hidrodinámicos más detallados en fases posteriores del diseño para validar y optimizar completamente las proporciones del catamarán, asegurando un rendimiento eficiente y seguro.

3.4 Motor

Teniendo en cuenta que la resistencia al avance que debe superar la plataforma para alcanzar una velocidad aproximada de 5 nudos es de 1,156 kW, se ha determinado la necesidad de instalar dos motores cuya potencia individual garantice superar dicha resistencia. Además, se ha optado por sobredimensionar el sistema de propulsión con el objetivo de que, en caso de fallo de uno de los motores, la plataforma pueda continuar operando con un solo motor, aunque con una maniobrabilidad reducida.

Dado que los motores serán alimentados por las baterías instaladas a bordo, estos deben ser eléctricos. Para identificar el sistema de propulsión más adecuado, se ha elaborado una base de datos

con diferentes modelos de motores disponibles en el mercado, analizando sus características técnicas y su compatibilidad con las necesidades de la plataforma, representada en la Tabla 3-3.

Tras el análisis de las opciones recopiladas, se han descartado los motores con potencias superiores a 3 kW, pues supondrían un sobredimensionamiento innecesario, así como los motores de 1 kW, que no garantizarían el desplazamiento seguro de la plataforma en caso de emergencia con un único motor. Asimismo, se ha considerado conveniente optar por motores de tipo POD, ya que estos eliminan la necesidad de incorporar un timón adicional. Como se indica en la documentación de ePropulsion, los motores POD permiten un giro de 360°, lo que facilita significativamente las maniobras y mejora la capacidad de control de la plataforma.

Compañía	Nombre del motor	Potencia (kW)	Peso (kg)	Voltaje (V)
ePropulsion	POD Drive 1.0 EVO	1,0	6,2	48
	POD Drive 3.0 EVO	3,0	15,3	48
	POD Drive 6.0 EVO	6,0	31,0	48
Kräutler	GPRV 2,2	1,9	21,0	36
	GPRV 1,6	1,8	21,0	24
	ACR 1,8	1,8	22,0	24
	ACR 2,0	2,0	30,0	24
Nautasystem	SD6	6,0	42,5	48
Transfluid	PMSM 180-4	2,0	19,0	62

Tabla 3-3 Base de datos de motores.

Finalmente, entre las opciones viables, se han valorado las propuestas de dos fabricantes: ePropulsion y Kräutler. Dado que las baterías de ePropulsion ofrecen una excelente relación entre capacidad y dimensiones, se ha optado por el motor POD Drive 3.0 Evo, Figura 3-3, que proporciona una potencia de 3 kW (6 HP) y funciona a 48 V, lo que resulta adecuado para satisfacer los requerimientos energéticos del sistema.

Este motor presenta otras ventajas destacables, como su funcionamiento prácticamente silencioso, lo que minimiza la contaminación acústica durante la operación, y su diseño sin mantenimiento gracias a la tecnología de transmisión directa, que elimina la necesidad de caja de engranajes y reduce significativamente el número de piezas móviles, mejorando así la fiabilidad del conjunto. Además, incorpora un sistema de hidrogenación, capaz de recuperar energía mientras la plataforma se desplaza impulsada por el viento o la corriente, contribuyendo de esta manera a una mayor eficiencia energética y sostenibilidad. Por todo ello, el POD Drive 3.0 Evo se considera una solución óptima para la plataforma, al ofrecer un equilibrio adecuado entre potencia, eficiencia, fiabilidad y seguridad, garantizando además una integración eficiente con el sistema energético previsto a bordo.

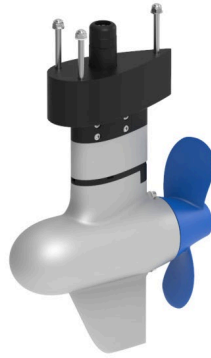


Figura 3-3 Motor POD Drive 3.0 de ePropulsion [67].

3.5 Estaciones de recarga

Una de las partes fundamentales de la plataforma es la estación de recarga, ya que garantiza la autonomía operativa de los drones y su disponibilidad para misiones continuadas. Además de proporcionar almacenamiento y protección, la estación de recarga debe integrarse correctamente en el balance eléctrico de la plataforma, asegurando un consumo energético eficiente y sostenible. Su selección y diseño son aspectos clave dentro de este trabajo, ya que impactan directamente en la operatividad y en la capacidad de la plataforma para mantener drones en funcionamiento sin interrupciones.

La plataforma contará con varias estaciones de recarga, las cuales pueden adoptar diferentes métodos, como se menciona en el apartado de Estaciones de recarga para UAV: perspectiva actual. No obstante, la opción más adecuada para este caso es el sistema de cambio de baterías. En la Figura 3-4 se muestra un ejemplo de cambio de batería del modelo Atlas de Hextronics. Además, se busca que la estación no solo permita la recarga, sino que también proporcione almacenamiento y protección al dron. Por esta razón, se ha optado por una solución DAB (*Drone-in-a-Box*), ya que permite que los drones completen su misión, aterricen y se recarguen sin intervención humana. Este aspecto es crucial, especialmente en condiciones adversas en alta mar, donde una estación sin protección adecuada podría exponer el dron al riesgo de caer al agua debido a la falta de sujeción.



Figura 3-4 Método de cambio de batería Atlas Hextronics [68].

En (a) se aprecia como se retira la batería descargada y en (b) como se coloca la batería cargada.

Otro requisito fundamental es que la estación de recarga esté diseñada para operar en entornos marítimos. Debe ser resistente a la humedad, la salinidad y otros factores ambientales característicos de estas zonas, además de soportar condiciones climáticas severas.

Asimismo, el peso y las dimensiones de la estación son factores determinantes. Existen hangares cuyo tamaño y peso superan los límites que la plataforma puede soportar, por lo que es esencial elegir una opción que permita la integración segura de múltiples estaciones de recarga. Esto garantizará redundancia operativa en el sistema, un aspecto clave en entornos militares.

Es importante considerar que no todas las estaciones de recarga son compatibles con todos los modelos de drones. Las diferencias en dimensiones e interconectividad pueden impedir que ciertos drones utilicen un sistema de cambio de baterías. Como se menciona en el apartado de Objetivos, los drones seleccionados para esta plataforma deben ser VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), eléctricos y de tamaño moderado, asegurando su compatibilidad con la estación de recarga.

Por último, otro requisito esencial es que la estación cumpla con los estándares BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*), lo que permitirá operar el dron sin necesidad de mantener contacto visual directo. Esto es crucial para misiones de larga duración y operaciones que requieren discreción. Sin embargo, este tipo de operación conlleva mayores exigencias en términos de permisos y medidas de seguridad en comparación con los sistemas VLOS (*Visual Line of Sight*), lo que representa un desafío adicional en la selección de una estación adecuada.

El proceso de cambio de batería en drones también presenta un desafío relacionado con el sistema de climatización HVAC, ya que las baterías deben mantenerse en condiciones específicas de temperatura y humedad para su correcto funcionamiento. Esta necesidad implica un mayor consumo de energía en comparación con otros sistemas de recarga, como las estaciones de recarga por contacto o inalámbricas. Sin embargo, el cambio de batería permite minimizar los tiempos de inactividad y optimizar la operatividad de los drones.

3.5.1.1 Modelo de Plataforma Utilizado: Hextronics Universal

Para la implementación de la plataforma en este proyecto, se tomará como referencia la estación de cambio de baterías Hextronics Universal, la cual se muestra en la Figura 3-5. Este sistema es idóneo debido a su capacidad de permitir operaciones de vuelo más frecuentes mediante el intercambio rápido de baterías, las cuales son recargadas dentro del propio sistema después de su uso. Este enfoque garantiza una mayor eficiencia en la gestión energética y mejora la autonomía operativa de los drones. Las características principales se encuentran reflejadas en la Tabla 3-4.

Propiedad	Dimensiones (m)	Peso sin dron (kg)	Consumo en reposo (W)	Consumo máximo (W)	Tiempo cambio de batería (s)	Tiempo recarga batería (h)
Valor	1,07 x 0,76 x 0,31	31,75	80	650	80	1

Tabla 3-4 Características de Hextronics Universal [68].

La estación Hextronics Universal cumple con todas las especificaciones requeridas en el proyecto y presenta dimensiones y características que se adecuan a las necesidades operativas establecidas. Sin embargo, su uso está limitado a drones compatibles con el sistema.

Para garantizar que la estación cumpla con todos los requerimientos operativos, es necesario incorporar módulos adicionales que optimicen su funcionalidad. Entre estos módulos se encuentra el Edge Compute, el cual permite el procesamiento inmediato de datos a bordo, mejorando la eficiencia en la toma de decisiones y reduciendo la latencia en la transmisión de información.

Asimismo, se debe incluir la Expansión Celular, que proporciona conectividad 5G a la estación, permitiendo su operación remota y asegurando una comunicación estable incluso a grandes distancias. Esto es fundamental para el monitoreo y control de la estación sin restricciones geográficas.

Por último, se recomienda la implementación del Estuche Pelican, una carcasa de alta resistencia diseñada para proteger la estación en entornos hostiles. Esta estructura robusta es especialmente adecuada para condiciones marítimas, asegurando la durabilidad y el correcto funcionamiento del sistema en escenarios adversos.

3.5.1.2 Compatibilidad de la Plataforma con Drones

Los drones compatibles con la plataforma Hextronics Universal son los que se encuentran en la Tabla 3-5 de especificaciones. Estos drones presentan una limitación común en términos de autonomía y alcance, ya que ninguno de ellos supera un rango operativo de 5 millas náuticas. Esta restricción debe considerarse al planificar las misiones y operaciones que dependerán del sistema de cambio de batería.



Figura 3-5 Estación de recarga para drones Universal de Hextronics [68].
Sistema de cambio de baterías de UAVs.

En la Tabla 3-5 se presenta con las especificaciones técnicas de cada dron para una comparación detallada de sus características y capacidades.

	Masa (g)	Rango (MN)	Tiempo (min)
DJI Mavic 3	920	5,0	45
Anzu Raptor	920	1,5	45
Parrot Anafi AI	898	0,9	32
Parrot Anafi USA GOV	500	1,5	32

Tabla 3-5 Drones compatibles con la plataforma Hextronics Universal [68].

3.5.1.3 Adaptabilidad de la estación de recarga a diferentes drones

En caso de que el dron seleccionado no se encuentre dentro de las opciones compatibles con la estación de recarga prevista, se podrían considerar diversas modificaciones. En primer lugar, sería necesario analizar si la estación es adecuada para el dron en términos de dimensiones y compatibilidad con el sistema de cambio de batería.

Si la estación no cumple con estos requisitos, otra alternativa sería optar por una estación de recarga específica para el dron en cuestión, ya que muchos modelos cuentan con su propia infraestructura de recarga diseñada por el fabricante. Sin embargo, es importante destacar que en el mercado las estaciones de cambio de batería son menos comunes en comparación con las opciones de recarga por conexión directa, lo que puede afectar la operatividad del sistema al aumentar el tiempo necesario para disponer de un dron completamente cargado.

Para mitigar esta posible reducción en la disponibilidad operativa, se recomienda considerar la integración de tres estaciones de recarga junto con tres drones, permitiendo así mantener una rotación constante en las operaciones aéreas. Esto se debe a que, al depender de una estación de recarga con conexión directa, se pierde la ventaja de que una batería vacía pueda recargarse de manera independiente mientras el dron sigue en operación con otra batería cargada. De esta forma, la inclusión de múltiples estaciones permitiría compensar esta limitación y garantizar una mayor continuidad en las misiones.

3.6 Sistema energético

Esta plataforma tiene un componente eléctrico fundamental, ya que es completamente eléctrica y cuenta con baterías para un almacenamiento de la energía y placas solares como una fuente de energía. Para garantizar un flujo eficiente entre ambos, es necesario el uso de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). Además, es crucial incorporar convertidores que adapten la tensión al voltaje requerido por los distintos elementos de la plataforma que consumen electricidad.

En la Figura 3-6 se pueden observar los componentes clave de cualquier sistema aislado que integre placas solares. Además, se observan de manera resumida los componentes principales del sistema energético de la plataforma. Este diagrama se presenta con mayor detalle representado en un plano unifilar en el Anexo VI: Unifilar de la instalación.

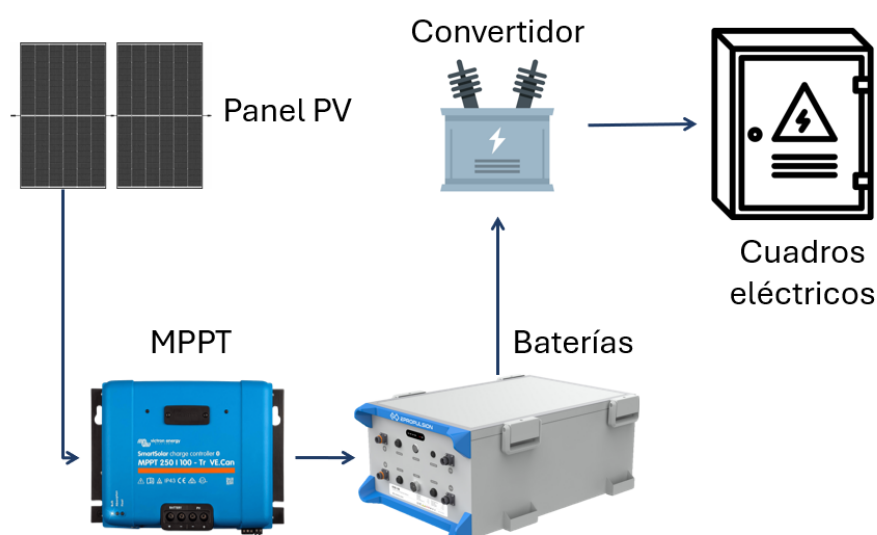


Figura 3-6 Resumen gráfico del sistema energético.

3.6.1 Balance energético

A continuación, se presenta el balance energético de la plataforma, Tabla 3-6, en el que se detallan los consumos de cada elemento a bordo. La estructura del balance sigue el siguiente criterio: primero se indica el elemento, seguido del consumo energético por hora de uso. Para cada elemento, se realizan dos estudios diferenciados en función del estado operativo de la plataforma según el apartado del Perfil de misión:

1. Operaciones en tránsito: corresponde al período en el que la plataforma se desplaza desde el buque nodriza hasta la zona de operación.
2. Operaciones en zona de despliegue: fase en la que la plataforma permanece en su área de trabajo realizando las funciones para las que ha sido diseñada.

Para cada sistema, el consumo horario se calcula multiplicando su potencia por el factor de uso específico en cada fase y las horas de uso diarias estimadas. Elementos que requieren funcionamiento

continuo, como los sistemas de comunicaciones o los extractores, presentan un factor de uso de 1 en ambas fases.

Se ha considerado que la plataforma debe garantizar una autonomía mínima de tres días, distribuidos en 10 horas de tránsito y 62 horas de operaciones estacionarias, de acuerdo con los requisitos operativos definidos para entornos tácticos navales. Durante este período, no se considera la aportación energética de los paneles solares, por lo que toda la demanda debe ser cubierta exclusivamente por el sistema de baterías. Con el objetivo de garantizar la autonomía de la plataforma incluso en condiciones desfavorables para la captación solar, el dimensionamiento del sistema de baterías se ha realizado sin tener en cuenta ninguna contribución energética procedente de los paneles solares.

Elemento	Datos eléctricos	Tránsito		Operaciones	
Servicio	Potencia (W)	Factor	Consumo (Wh)	Factor	Consumo (Wh)
Motor Br	580	1,00	580,00	0,38	217,50
Motor Er	580	1,00	580,00	0,38	217,50
Navegación	240	1,00	240,00	0,38	90,00
Comunicaciones	200	1,00	200,00	1,00	200,00
Puesto recarga en uso	650	0,63	406,25	0,63	406,25
Puesto recarga en reserva	80	1,38	110,40	1,38	110,40
Cámara	8	1,00	8,00	1,00	8,00
Extractor Er	36	1,00	36,00	1,00	36,00
Extractor Br	36	1,00	36,00	1,00	36,00
Sondador	10	1,00	10,00	1,00	10,00
Estación meteo	1	1,00	1,00	1,00	1,00
Luces de navegación	20	0,58	11,67	0,58	11,67
Tiempo uso (h)			10,00	62,00	
Consumo total (kWh)			105,54		
Capacidad necesaria (kWh)			131,93		

Tabla 3-6 Balance energético.

En el caso de las estaciones de recarga de UAV, se han instalado dos unidades, aunque no operan de forma simultánea a plena carga. Se ha determinado un factor de uso de 1,38 para la estación en modo reposo, considerando que siempre habrá una en espera mientras la otra está en funcionamiento. Para la estación activa, se ha definido un factor de uso de 0,63, obteniendo así un total de 2, que representa el sistema completo operando de manera alterna.

Asimismo, para preservar la vida útil del sistema de baterías, se limita su descarga útil al 80 % de la capacidad total instalada. Por ello, el consumo energético total estimado se divide por 0,8 a fin de dimensionar correctamente la capacidad mínima necesaria del sistema de almacenamiento.

Como resultado, se obtiene un consumo total de 105,54 kWh, lo que implica una capacidad mínima necesaria de 131,93 kWh para las baterías de la plataforma.

Por último, se ha determinado que la potencia máxima instantánea requerida en caso de que todos los sistemas estén en funcionamiento simultáneamente asciende a 2,44 kW. Este valor es fundamental para el dimensionamiento de los elementos del sistema eléctrico, como el inversor, protecciones y cableado, garantizando la estabilidad y seguridad del suministro energético a bordo.

3.6.2 Baterías

3.6.2.1 Baterías LiFePO_4

Las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO_4) han demostrado ser una de las tecnologías de almacenamiento energético más seguras y confiables para aplicaciones marítimas y sistemas solares. Una de sus principales ventajas es su estabilidad química y térmica, lo que las hace altamente resistentes a la fuga térmica y minimiza el riesgo de incendios, una preocupación clave en entornos marinos [69]. En comparación con otras baterías de ion-litio, las LiFePO_4 poseen una mayor vida útil, alcanzando entre hasta 3.000-5.000 ciclos de carga, lo que las hace ideales para aplicaciones de larga duración y de alta demanda energética [70].

Además de su seguridad y longevidad, las baterías LiFePO_4 son altamente eficientes en sistemas fotovoltaicos y marinos debido a su capacidad para operar en rangos amplios de temperatura sin una degradación significativa del rendimiento. Su menor impacto ambiental, en comparación con otras baterías de ion-litio, también es una ventaja, ya que no contienen metales pesados tóxicos como cobalto o níquel, lo que las hace más fáciles de reciclar y menos contaminantes para los ecosistemas acuáticos. A pesar de que su costo inicial puede ser mayor que otras tecnologías, su costo por ciclo de vida es menor debido a su alta durabilidad y eficiencia, lo que las convierte en una inversión estratégica para plataformas solares flotantes y embarcaciones eléctricas [71].

3.6.2.2 Consideraciones

Para la selección de las baterías en este proyecto, se ha establecido que el sistema de almacenamiento energético debe cumplir con ciertos requisitos esenciales para optimizar la eficiencia y operatividad de la plataforma marítima.

Alta capacidad de almacenamiento con densidad energética optimizada:

- Se busca maximizar la capacidad de almacenamiento energético sin aumentar significativamente el espacio y el peso total del sistema.

Voltaje adecuado para compatibilidad con los paneles solares:

- Dado que el sistema fotovoltaico instalado opera con un voltaje superior a 24 V, es imprescindible que las baterías seleccionadas trabajen con tensiones iguales o superiores. Este criterio ha reducido significativamente el número de opciones viables, eliminando aquellas baterías de 12 V, que requerirían una configuración en serie más compleja.

Sistema de gestión de batería integrado:

- Es fundamental que la batería incorpore un sistema de gestión de batería (BMS), que optimice el rendimiento energético, controle la temperatura, proteja contra sobrecargas y equilibre las celdas internas. Esto reduce la necesidad de sistemas externos adicionales, simplificando la arquitectura eléctrica de la plataforma.

Resistencia al agua y certificaciones para entornos marinos:

- Debido a la exposición constante a la humedad y la salinidad, las baterías deben contar con protección IP67 o superior, garantizando resistencia al agua y operación segura en cualquier condición climática.

Alta velocidad de carga para minimizar tiempos de inactividad:

- La plataforma requiere un sistema que permita recargas rápidas (1C) para reducir los tiempos de inactividad y asegurar una operación continua.

Certificaciones internacionales de seguridad y transporte:

- Para garantizar la seguridad y conformidad con normativas internacionales, es esencial que las baterías cuenten con certificaciones como CE, UKCA, FCC y UN38.3, que validan su seguridad para transporte y operación en entornos marítimos.

3.6.2.3 Selección de batería

Tras evaluar todas las opciones presentadas en la Tabla 3-7, se concluye que la batería que mejor se adapta a los requisitos de la plataforma es la ePropulsion G102-100. Esta elección se justifica tanto por sus características técnicas como por sus dimensiones, que permiten su integración en los cascos del catamarán sin comprometer el espacio disponible ni afectar a la estabilidad de la estructura. Además, dado que el motor seleccionado también pertenece a la marca ePropulsion, se optimiza la compatibilidad y se facilita la conexión del sistema eléctrico, mejorando la eficiencia y fiabilidad de la instalación.

Empresa	Modelo	Energía (Wh)	Voltaje (V)	Dimensiones (mm)	Peso (kg)
ePropulsion	E60	3072	51,2	512 x 290 x 300	33,0
	E163	8345	51,2	470 x 295 x 495	76,0
	G102-100	10240	102,4	680 x 500 x 300	100,0
	G102-230	23552	102,4	1287 x 366 x 295	180,0
Victron	Lithium Smart 12.8V/200Ah	2560	12,8	237 x 321 x 152	20,0
RELiON	RB24V100	2560	25,6	520,8 x 267,8 x 221	27,7
	RB100-HP	1280	12,8	329 x 172 x 214,7	13,5
	RB200	2560	12,8	520,8 x 267,8 x 221	27,7
	RB300	3840	12,8	520,8 x 267,8 x 221	34,4
	RB100	1280	12,8	329 x 172 x 214,7	13,5

Tabla 3-7 Base de datos de baterías.

De acuerdo con los cálculos energéticos realizados y recogidos en el apartado de Balance energético del proyecto, la capacidad total necesaria para satisfacer la demanda durante tres días de operación autónoma asciende a 131,93 kWh. Para cubrir esta necesidad, se ha optado por emplear baterías del fabricante ePropulsion, cada una con una capacidad unitaria de 10,24 kWh.

La selección del número de baterías se ha realizado dividiendo la capacidad total requerida entre la capacidad individual de cada batería y redondeando al entero superior par más cercano, lo que garantiza la continuidad operativa de la plataforma incluso en escenarios de baja o nula producción fotovoltaica, dada la variabilidad de esta fuente energética. Como resultado, se ha determinado la instalación de 14 baterías, proporcionando una capacidad total de 143,36 kWh.

Esta capacidad adicional de 11,43 kWh respecto a la demanda calculada ofrece un margen de seguridad energético, permitiendo absorber consumos imprevistos o atender futuras ampliaciones del sistema eléctrico sin comprometer la operatividad.

Para asegurar una distribución equilibrada del peso y mantener la estabilidad transversal del catamarán, las baterías se han organizado en dos bancos simétricos de 7 unidades conectadas en paralelo ubicados en el interior de los cascos. Esta configuración contribuye además a optimizar el espacio disponible y facilita el acceso para labores de mantenimiento.

La Tabla 3-8 presenta un resumen de la distribución del sistema de almacenamiento energético en la plataforma.

Capacidad unitaria	Peso unitario	N.º baterías	Peso total	Largo	Ancho	Capacidad total
(kW)	(kg)		(kg)	(m)	(m)	(kW)
10,24	100	14	1400	4,9	0,4	143,36

Tabla 3-8 Distribución y características técnicas del sistema de baterías.

De acuerdo con los cálculos realizados y recogidos en el balance energético del proyecto, la demanda máxima simultánea de potencia de todos los sistemas de consumo a bordo asciende a 2,44 kW. Para satisfacer esta exigencia, el sistema de almacenamiento energético debe ser capaz de proporcionar, al menos, dicha potencia de forma continua y estable.

Según las especificaciones técnicas del banco de baterías seleccionado en el Anexo VII: Especificaciones de fabricante, se permite una corriente máxima de descarga de 100 A a un voltaje nominal de 102 V. La potencia disponible se obtiene utilizando la ecuación fundamental de potencia eléctrica (3-18):

$$P_d = V \cdot I \quad (3-18)$$

Donde:

- P_d : es la potencia disponible en W
- V: es el voltaje nominal en V
- I: es la corriente máxima de descarga en A.

Despejando la ecuación (3-18) se obtiene:

$$P = 102 \cdot 100 = 10200 \text{ W} = 10,20 \text{ kW}$$

Este valor representa la potencia máxima que puede entregar el sistema de baterías, y supera ampliamente la demanda máxima de la plataforma, proporcionando un amplio margen de seguridad. Esta diferencia garantiza un funcionamiento confiable incluso ante picos de consumo puntuales, y contribuye a prolongar la vida útil del sistema al evitar operar cerca de su límite de capacidad.

Las baterías seleccionadas deben contar con un sistema de conexión a tierra que permite su recarga desde un punto fijo antes del inicio de la misión. Esta característica asegura que el sistema de

almacenamiento energético comience cada operación con la carga completa, garantizando así la autonomía de tres días.

Una ventaja significativa de estas baterías es su capacidad de recarga completa en aproximadamente una hora, lo cual representa un aspecto clave en la planificación operativa de la plataforma. Por tanto, se establece como requisito que el sistema de baterías esté alistado al menos una hora antes del despliegue, asegurando así que todas las unidades se encuentren totalmente cargadas al momento del inicio de la misión.

3.6.3 Paneles solares

Los paneles solares constituyen una parte fundamental dentro de este proyecto, ya que son los pulmones de esta plataforma. Serán los encargados de aportar energía, aumentando la autonomía del sistema.

3.6.3.1 Consideraciones

Para la selección de los paneles se han tenido en cuenta principalmente dos criterios: el espacio disponible y la capacidad de generación de energía. El objetivo es contar con un sistema fotovoltaico que proporcione suficiente energía para la carga de las baterías del sistema, manteniendo una estructura compacta que no incremente significativamente las dimensiones de la plataforma.

Además, se ha optado por paneles monocristalinos debido a su mayor eficiencia en comparación con otros modelos. Otro aspecto clave es el cumplimiento de la norma IEC 61701, que garantiza su resistencia en entornos marinos, protegiéndolos de la corrosión provocada por la niebla salina.

También es fundamental considerar los factores externos que afectan directamente el rendimiento de los paneles solares. Uno de los más relevantes es la temperatura, ya que el calor excesivo puede reducir su eficiencia. Sin embargo, en este caso, al tratarse de un entorno marino, la temperatura de los paneles se verá regulada en parte por el movimiento de la plataforma y el flujo de aire en la zona, aunque no se descarta la posibilidad de implementar un sistema de refrigeración por agua.

Otro parámetro crítico es la inclinación de los paneles solares, ya que esta influye significativamente en su eficiencia. Sin embargo, se ha optado por instalarlos en posición horizontal para minimizar el impacto del viento, evitando un abatimiento continuo que podría comprometer la estabilidad de la plataforma. Esta disposición también simplifica la orientación de los paneles hacia el sur para optimizar la captación de energía.

También se ha evaluado la viabilidad de implementar un sistema de seguimiento solar automatizado para mejorar la captación de energía. No obstante, debido a las condiciones operativas de la plataforma, se ha priorizado una instalación con el menor número posible de articulaciones móviles para reducir posibles fallos mecánicos y facilitar el mantenimiento.

Otro aspecto a considerar es la posible generación de sombras, lo que puede afectar notablemente la eficiencia de los paneles. Sin embargo, en este caso, este problema es mínimo, ya que no hay estructuras externas que puedan proyectar sombras sobre los paneles solares. Aun así, se ha planificado su instalación en una zona libre de interferencias, evitando que los dispositivos de comunicación o las estaciones de recarga de drones generen obstrucciones que reduzcan su rendimiento.

Además, el sistema eléctrico de los paneles solares debe diseñarse de manera óptima. El cableado debe estar sobredimensionado para evitar pérdidas de energía debidas a una sección insuficiente del conductor. Asimismo, se recomienda el uso de diodos antirretorno para prevenir el flujo inverso de energía durante la noche, evitando así posibles deterioros en los paneles solares.

3.6.3.2 Selección de paneles fotovoltaicos

Tal y como se muestra en el apartado de Metodología, para este proyecto se han seleccionado paneles solares que cumplan con los requisitos energéticos necesarios para la carga de los drones, asegurando al

mismo tiempo que puedan integrarse en una plataforma de dimensiones reducidas. También se ha considerado la irradiación solar en las zonas de operación para estimar la cantidad óptima de paneles necesarios, ya que la producción de energía varía significativamente según la ubicación y la época del año. Este estudio se encuentra en el Anexo VIII: Producción de las placas solares.

Para garantizar un rendimiento adecuado, los paneles deben cumplir con la norma IEC 61701, que certifica su resistencia en entornos marinos. Esto es crucial, ya que el contacto continuo con la niebla salina puede acelerar la degradación de los materiales y reducir la vida útil de los paneles solares.

En la Tabla 3-9, se presentan distintas opciones de paneles solares comerciales que han sido evaluadas en función de sus características técnicas, como dimensiones, potencia, relación potencia/área y eficiencia.

Empresa	Modelo	Largo (mm)	Ancho (mm)	Potencia Total (W)	Relación W/m²	Eficiencia (%)
SunPower	SPR-MAX3-400-BLK	1812	1046	400	211,0	21,5
	SPR-MAX3-415-BLK	1812	1046	415	219,0	22,0
	SPR-MAX3-420-BLK	1812	1046	420	221,7	22,2
Trina Solar	TSM-510 NEG18R.28	1961	1134	510	229,4	22,9
Sanyo	HIT Power 225A	1580	798	225	178,6	20,2
TechnoSun	Flex100W12V (Flexible)	1050	540	100	176,4	19,9
	Flex120W12V (Flexible)	1305	540	120	170,2	20,0

Tabla 3-9 Base de datos de paneles solares.

El análisis realizado muestra que los paneles solares flexibles presentan menor eficiencia en comparación con los rígidos, por lo que han sido descartados. Dentro de las opciones evaluadas, destacan dos modelos: SPR-MAX3-420-BLK y TSM-NEG18R.28, siendo este último el más eficiente con una relación potencia/espacio de 229,4 W/m².

En la Tabla 3-10 se pueden observar con mayor detalle otros parámetros clave para diferenciar entre los modelos. Aunque el Maxeon 3 ofrece una mejor garantía y una menor degradación anual, el panel de Trina Solar proporciona una potencia significativamente mayor. Dado que ambos modelos están diseñados para soportar condiciones en entornos marinos y resistir vientos fuertes, el panel solar que mejor se adapta a las necesidades del proyecto es el Trina Solar TSM-NEG18R.28.

Para la implementación del sistema de generación solar, se ha optado por la instalación de 16 paneles fotovoltaicos, organizados en cuatro *strings*. Cada *string* estará compuesto por un conjunto de módulos conectados en serie, y se conectarán en pares a controladores de carga MPPT. Esta configuración permite optimizar la captación y gestión de la energía solar, garantizando un rendimiento eficiente del sistema.

Con esta disposición, se obtiene una potencia total instalada de 8,16 kW, teniendo en cuenta las características individuales de cada panel. Según el estudio incluido en el Anexo VIII: Producción de las placas solares, en promedio, los lugares analizados permiten cubrir aproximadamente un 79 % del consumo diario únicamente con energía solar, lo que incrementaría la autonomía en más de dos días.

Parámetro	SunPower MAX3-420-BLK	Trina Solar TSM-510 NEG18R.28
Potencia (W)	420	510
Peso (kg)	21,2	23,5
Resistencia al viento (Pa)	4200	2400
Garantía	40	30
Degradación Anual (%)	0,25	0,40

Tabla 3-10 Características SunPowerMAX3-420-BLK y TSM-510 NEG18R.28.

La selección y distribución de los paneles solares se ha realizado en función del espacio disponible en la cubierta superior de la plataforma, con el objetivo de incorporar el mayor número posible de módulos sin comprometer la operatividad ni el equilibrio estructural del catamarán.

La superficie ocupada por los paneles solares será de aproximadamente 9,6 metros de eslora por 4 metros de manga, permitiendo una instalación ordenada y accesible. Los módulos se dispondrán alineados a lo largo de la crujía, agrupados en pares, lo que favorece tanto la eficiencia energética como el mantenimiento del sistema. Esta configuración también considera el espacio necesario para la interconexión entre módulos y componentes electrónicos.

En la Figura 3-7 se presenta una vista superior del catamarán con la disposición propuesta de los paneles solares, así como la ubicación de los *strings*, señalados mediante recuadros rojos para una mejor comprensión del diseño.

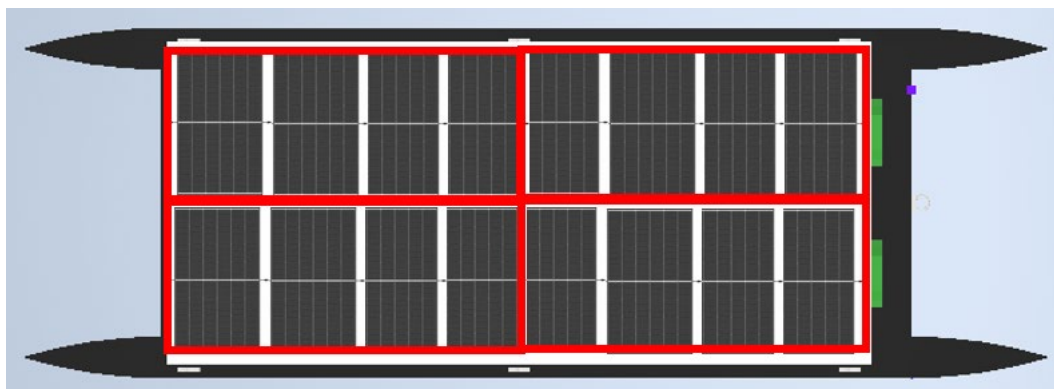


Figura 3-7 Distribución de las placas solares.

3.6.4 MPPT

Un MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) es un dispositivo electrónico que optimiza la transferencia de energía de un sistema fotovoltaico al sistema de almacenamiento o a la carga. Su función principal es ajustar de manera automática la tensión y la corriente del sistema solar para que opere en el

punto de máxima potencia (MPP), maximizando así la eficiencia de conversión de energía en condiciones variables de irradiación y temperatura [72].

Para este proyecto, se ha determinado que el MPPT más adecuado es de tipo *Perturb and Observe* (P&O), ya que ofrece una solución eficiente y de fácil implementación para la optimización del sistema fotovoltaico. La técnica P&O permite extraer la máxima potencia del conjunto de paneles solares ajustando dinámicamente la tensión y corriente en función de pequeños cambios en el punto de operación. Este método es especialmente ventajoso para la plataforma, ya que su simplicidad de implementación y bajo costo lo hacen ideal para sistemas de generación solar con almacenamiento en baterías, como el diseñado en este proyecto [73].

3.6.4.1 Consideraciones

Para la plataforma se ha diseñado un sistema de generación fotovoltaica compuesto por 16 paneles solares. Cada panel seleccionado presenta un voltaje de circuito abierto (Voc) de 40,6 V. Estos paneles se organizarán en *strings* de 4 paneles conectados en serie, lo que permitirá obtener un voltaje total por *string* de 162,4 V. Dado que la conexión es en serie, la corriente permanecerá constante en 15,14 A, correspondiente a la corriente nominal del panel.

Posteriormente, se conectarán dos *strings* en paralelo, lo que duplicará la corriente total del sistema hasta alcanzar 30,28 A, mientras que el voltaje se mantendrá en 162,4 V, conforme a las propiedades de la conexión en paralelo.

Para gestionar y adaptar la energía proveniente de los paneles solares al sistema de almacenamiento y distribución de energía de la plataforma, se instalarán dos controladores MPPT modelo Victron SmartSolar 250/100, Figura 3-8. Estos reguladores permiten trabajar con tensiones de entrada de hasta 250 V y corrientes de hasta 100 A, lo que los hace perfectamente adecuados para garantizar una operación segura y eficiente del sistema fotovoltaico diseñado. Además, cada MPPT se encargará de enviar la energía generada a su correspondiente banco de baterías de 102,4 V DC, ubicado en cada banda de la plataforma, permitiendo así una gestión energética independiente y equilibrada entre ambos lados del sistema, lo que aumenta la fiabilidad y la autonomía de la instalación.

Además, el modelo Victron SmartSolar 250/100 resulta especialmente apropiado para entornos marinos debido a su robusta protección contra humedad, salinidad y corrosión, características esenciales en instalaciones expuestas a condiciones ambientales adversas como las presentes en plataformas navales. Estos dispositivos cuentan con un grado de protección IP43 (o superior con accesorios adicionales) y utilizan componentes electrónicos protegidos mediante recubrimientos especiales que prolongan su vida útil frente a la exposición continua a ambientes agresivos. Asimismo, incorporan sistemas avanzados de gestión térmica que aseguran su funcionamiento eficiente incluso en climas cálidos y con elevada radiación solar, garantizando así la fiabilidad y seguridad energética del sistema en el entorno marítimo.



Figura 3-8 Victron SmartSolar 250/100 [74].

Además, Victron dispone de un software que permite monitorizar en tiempo real la generación de energía de los paneles solares, el consumo energético y el porcentaje de almacenamiento de las baterías. Este sistema es una herramienta clave para la detección de errores, ya que proporciona información detallada de cada panel fotovoltaico de manera individual. De este modo, en caso de fallo, es posible identificar rápidamente cuál es el componente que está generando el problema. Asimismo, el software permite controlar y gestionar el sistema a distancia, ofreciendo mayor flexibilidad y eficiencia operativa.

En la Figura 3-9 se muestra un ejemplo de una instalación fotovoltaica en una vivienda aislada, que además cuenta con un generador como sistema de respaldo. A través del software de Victron Energy, se puede visualizar en tiempo real la producción energética, el consumo de cargas y el nivel de carga de las baterías.

En la imagen superior, se observa la potencia generada por los paneles solares, la energía consumida por los dispositivos conectados y el estado de carga de la batería, lo que permite un monitoreo detallado del sistema. Además, se muestra un control remoto del sistema en la parte inferior, proporcionando una interfaz interactiva para la gestión y supervisión de la instalación.

Para la implementación de este sistema en la plataforma, es necesario integrar dos módulos principales. El primero es Cerbo GX: permite la visualización y gestión de los datos del sistema, ofreciendo una representación gráfica en tiempo real. El segundo es GlobalLink 520: proporciona conectividad a Internet mediante 5G, lo que permite el acceso continuo a la información del sistema y facilita su supervisión remota.

Gracias a estos módulos, se garantiza un control preciso del estado energético de la plataforma, optimizando su rendimiento y facilitando la identificación y resolución de posibles incidencias, asegurando así su correcto funcionamiento en todo momento.

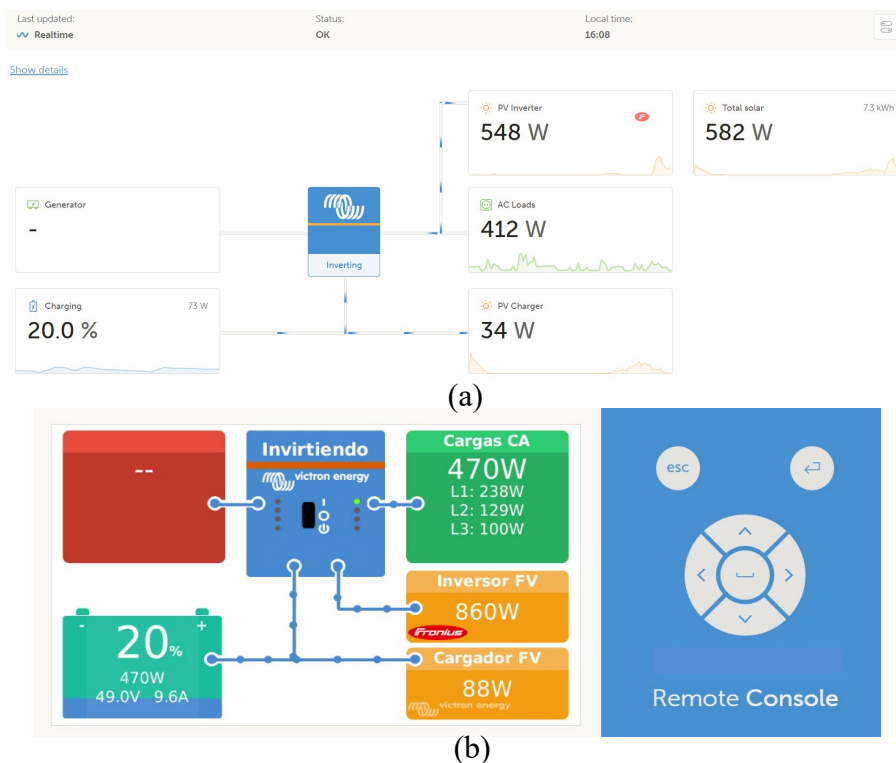


Figura 3-9 Presentación del software Victron Cerbo GX.
 Monitoreo (a) y control (b) de una instalación fotovoltaica aislada con Victron Energy.

3.6.5 Convertidores

Desde los bancos de baterías de 102,4 V DC, que actúan como el núcleo energético de la plataforma, se establece un Bus DC común encargado de distribuir la energía acumulada al conjunto de sistemas

eléctricos a bordo. Este Bus DC permite centralizar la gestión de la energía, facilitando una distribución eficiente y segura a todos los dispositivos de la plataforma, independientemente del voltaje al que operen. Debido a que cada equipo presenta diferentes necesidades de alimentación, es necesario instalar una serie de convertidores DC-DC capaces de adaptar la tensión del Bus DC a los niveles requeridos por cada carga. De este modo, la energía almacenada en las baterías se transforma según las demandas específicas de cada sistema, garantizando un funcionamiento óptimo y continuo.

Entre las principales conversiones se encuentra la de 100 V DC, destinada a la estación de recarga de drones, cuya proximidad de voltaje respecto al Bus DC permite alimentar el sistema mediante un regulador de tensión que estabilice y ajuste el suministro sin necesidad de grandes transformaciones. Por otro lado, se incorpora un convertidor a 48 V DC que proporciona energía a los motores de propulsión y otras cargas de alta potencia instaladas en la plataforma. Además, mediante otro convertidor, se reduce la tensión a 24 V DC para abastecer sistemas esenciales como las comunicaciones, los dispositivos de navegación y los extractores, garantizando su operatividad constante. Finalmente, se añade una conversión a 12 V DC, necesaria para el correcto funcionamiento de equipos de menor consumo como la ecosonda, las luces de navegación o las estaciones meteorológicas, entre otros.

La presencia de estos convertidores dentro de la plataforma evita la necesidad de incorporar sistemas de adaptación de voltaje en cada uno de los equipos de manera individual, lo que supone una mejora significativa en términos de simplicidad, eficiencia y mantenimiento del sistema eléctrico. Al concentrar la conversión de energía en puntos específicos, no solo se optimiza el cableado y se reduce el peso del conjunto, sino que también se facilita la supervisión y el diagnóstico de posibles incidencias, garantizando así un suministro eléctrico fiable y adaptado a las necesidades variables de operación en un entorno marino exigente.

3.6.6 Protecciones

Dentro del sistema eléctrico de la plataforma, es fundamental contar con mecanismos de protección que garanticen la seguridad del equipo y de los operadores, evitando fallos o daños en los componentes. Para ello, se implementan distintos dispositivos de protección, entre los que destacan los contactores, fusibles y disyuntores. Cada uno de estos elementos cumple una función específica en la prevención de sobrecargas, cortocircuitos y fallos eléctricos, asegurando la continuidad operativa de la estación de recarga.

3.6.6.1 Fusibles

Los fusibles son dispositivos de seguridad diseñados para proteger el circuito eléctrico ante sobre corrientes o cortocircuitos. Su funcionamiento se basa en un filamento interno que se funde cuando la corriente supera un límite determinado, interrumpiendo el flujo eléctrico y evitando daños en el sistema.

Dentro de la estación de recarga, los fusibles actúan como una primera línea de defensa, protegiendo componentes sensibles como baterías, convertidores y sistemas de control. Su correcta selección y dimensionamiento son esenciales para garantizar una protección eficaz sin afectar el rendimiento del sistema.

3.6.7 Disyuntor

El disyuntor es otro dispositivo de protección que actúa como un interruptor automático capaz de desconectar el circuito en caso de sobrecargas o cortocircuitos. A diferencia de los fusibles, los disyuntores no requieren reemplazo tras su activación, ya que pueden ser rearmados manualmente una vez resuelto el problema.

En la estación de recarga, los disyuntores cumplen una función clave en la protección de los sistemas eléctricos ante fallos imprevistos. Además, permiten una gestión más eficiente de la seguridad eléctrica, ya que pueden integrarse con sistemas de monitoreo para detectar anomalías y prevenir daños en los equipos.

3.6.7.1 Diodos de No Retorno

Los diodos de no retorno son dispositivos esenciales en sistemas que incluyen paneles solares, como es el caso de la estación de recarga. Su función principal es evitar que la corriente fluya en sentido inverso cuando la producción de energía fotovoltaica es insuficiente o inexistente, evitando que las baterías descarguen energía de vuelta a los paneles solares.

En la estación de recarga, los diodos de no retorno garantizan un flujo de energía unidireccional, maximizando la eficiencia del sistema fotovoltaico y protegiendo tanto los paneles como las baterías. Su inclusión es crucial en condiciones de baja irradiación o durante la noche, cuando la diferencia de potencial podría generar pérdidas energéticas o incluso daños en los módulos solares.

4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

4.1 Resumen de los estudios realizados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los cálculos y simulaciones realizadas para validar el diseño de la plataforma. Se han analizado aspectos clave como la resistencia al avance, el balance energético, la producción de energía solar, la distribución del circuito eléctrico, la estabilidad, y la autonomía operativa.

El objetivo es determinar si la plataforma cumple con los requisitos de diseño, identificar posibles mejoras y evaluar su funcionalidad en condiciones operativas reales.

A continuación, se detallan los principales cálculos y análisis realizados:

- Cálculo de resistencia al avance: la resistencia total de la plataforma se ha determinado en 1,2 kW, lo que permite definir la potencia mínima requerida para la propulsión.
- Balance energético: se ha evaluado la autonomía energética, garantizando tres días de operación con las baterías y ampliando su duración con el sistema de paneles solares, resultando en un consumo total de 131,93 kW.
- Cálculo de estabilidad: se ha comparado el \overline{GM} de la plataforma con un monocasco, demostrando que la estabilidad transversal del catamarán es muy superior.
- Producción de energía solar: se ha analizado el rendimiento de los paneles solares en distintas ubicaciones y estaciones del año, verificando su impacto en la autonomía.
- Estudio del circuito eléctrico: se ha realizado un análisis de la distribución de la energía en la plataforma, validando su capacidad para abastecer todos los sistemas a bordo.

4.2 Características del catamarán

A continuación, se presenta en la Tabla 4-1 un resumen de las dimensiones principales y las características clave de la plataforma. En dicha tabla se incluyen parámetros fundamentales que definen el diseño del catamarán, tales como su eslora, manga, calado, desplazamiento y la potencia instalada. En el Anexo IX: Disposición general y detalles se presenta el conjunto de planos de la plataforma de disposición general y detalles.

Asimismo, se refleja la autonomía energética estimada, la cual ha sido calculada a partir del análisis de producción fotovoltaica incluido en el Anexo VIII: Producción de las placas solares, tomando como base la media de generación diaria obtenida por los paneles solares seleccionados. Esta media permite

dimensionar el sistema energético de forma realista para evaluar el rendimiento de la plataforma en condiciones operativas reales.

Característica	Valor
Eslora total (m)	14
Manga total (m)	5
Puntal (m)	1,5
Manga de cada casco (m)	0,6
Calado (m)	0,8
Desplazamiento (t)	6
GM transversal (m)	17,85
KG (m)	1,05
Sistema de propulsión	2 POD de 3kW
Velocidad de operación (kn)	5
Número de paneles solares	16
Potencia instalada en paneles (kW)	8,16
Capacidad de baterías (kW)	143,36
Numero de baterías	14
Autonomía sin paneles solares (días)	3
Autonomía con paneles solares (días)	5

Tabla 4-1 Resumen características principales de la plataforma.

Además, en la Figura 4.1 se muestra la representación en 3D del catamarán, modelada en Autodesk Inventor, proporcionando una visualización detallada de su diseño y configuración. Se aprecian los dos cascos del catamarán, así como su unión mediante una cubierta. En esta cubierta se encuentran las dos estaciones de recarga ubicadas en la proa, mientras que en la parte posterior hay un espacio reservado para el sistema de comunicaciones, la navegación y los controladores MPPT. No obstante, esta disposición puede variar en función de las necesidades de los propios elementos, como en el caso de las antenas de comunicaciones, que no deberían tener una plataforma encima que limite la propagación de la señal.

Por último, la plataforma cuenta con seis columnas, de 1 m de alto, que sostienen una estructura donde se encontrarían instalados los 16 paneles solares. También se puede observar una guía en la proa para facilitar el remolque de la plataforma y la presencia de cornamusas, que permiten abarload embarcaciones o colocar defensas para evitar daños en la estructura.

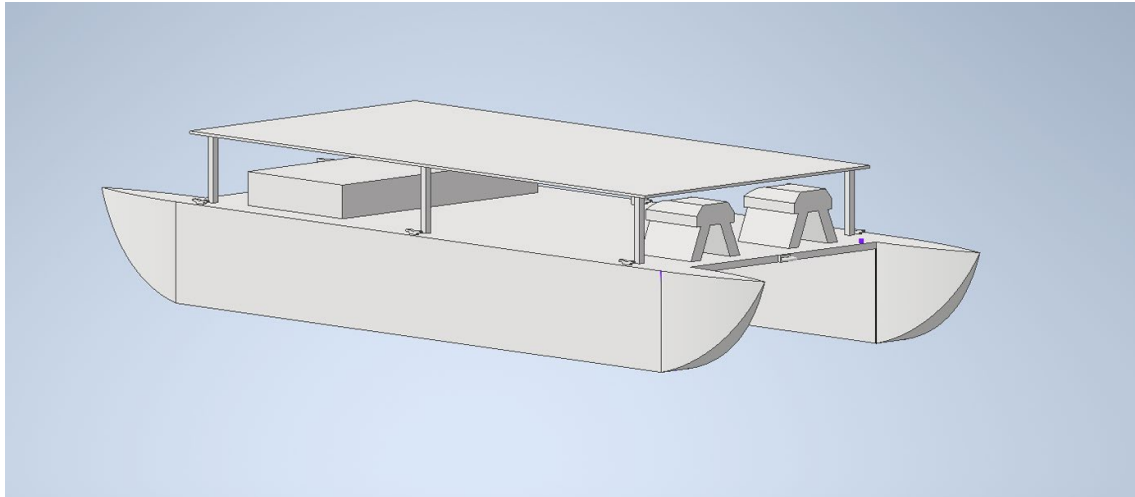


Figura 4-1 Representación en Autodesk Inventor de la plataforma.

4.3 Disposición general

En la Figura 4-2 se muestra la distribución de los compartimentos de la plataforma y sus elementos principales, permitiendo visualizar su disposición general.

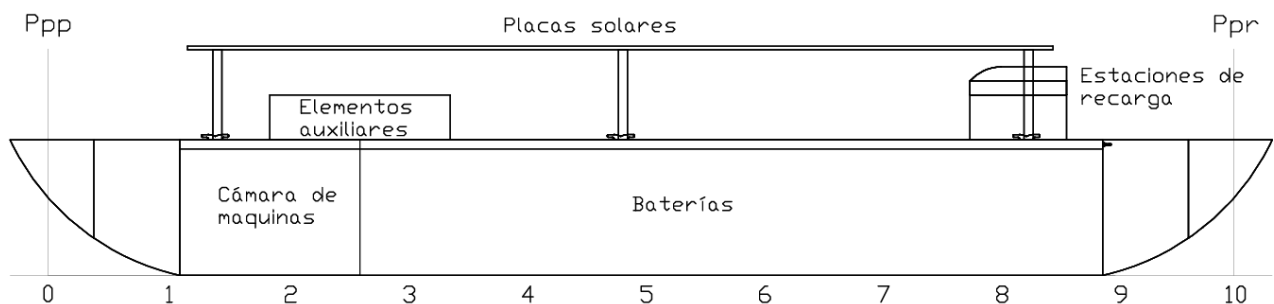


Figura 4-2 Disposición general del catamarán.

Entre los componentes más relevantes destacan:

- Placas solares: un conjunto de 16 paneles fotovoltaicos que suministran energía adicional a las baterías para aumentar la autonomía de la plataforma.
- Estaciones de recarga: dos hangares para drones, donde se lleva a cabo la carga y almacenamiento de las aeronaves no tripuladas.
- Elementos auxiliares: incluyen los dispositivos de navegación, comunicaciones y los reguladores MPPT, encargados de optimizar la carga solar.
- Cámara de máquinas: una en cada casco, donde se encuentran los sistemas esenciales para el funcionamiento de los motores.
- Baterías: distribuidas en ambos cascos, donde se ubican los bancos de baterías que almacenan la energía para el suministro eléctrico de la plataforma.

4.4 Validación del diseño

La validación del diseño se ha llevado a cabo a través de simulaciones y cálculos que han permitido verificar la estabilidad, la eficiencia del sistema de propulsión, el balance energético y la distribución eléctrica.

4.4.1 Estabilidad

Uno de los factores clave en el diseño de la plataforma es su estabilidad, ya que debe soportar variaciones de carga y condiciones adversas en el mar.

Los cálculos han demostrado que la plataforma mantiene un \overline{GM} transversal de 18,10 m, lo que confirma que tiene una excelente estabilidad lateral. En comparación con un monocasco, donde el \overline{GM} es 0,056 m, la plataforma presenta una resistencia mucho mayor a la escora, haciéndola adecuada para operar en mar abierto.

Por otro lado, el \overline{GM} longitudinal es similar tanto en el monocasco como en el catamarán, ya que en el plano longitudinal ambos presentan la misma geometría sumergida.

4.4.2 Sistema de propulsión

Para determinar la eficiencia del sistema de propulsión, se han analizado los motores eléctricos POD Drive 3.0, que han sido seleccionados por su bajo consumo y su capacidad para operar de manera silenciosa y eficiente.

Los resultados obtenidos confirman que los motores cumplen con la potencia requerida para alcanzar 5 nudos de velocidad de crucero. Se ha validado que, en caso de fallo de un motor, la plataforma aún podrá moverse, aunque con menor maniobrabilidad.

4.4.3 Producción de energía solar

Se ha realizado un estudio de la producción de los paneles solares considerando distintos escenarios operativos, ubicaciones geográficas y estaciones del año, presentado en Anexo VIII: Producción de las placas solares.

El análisis realizado muestra que, en invierno, la producción mínima entre los puntos de interés se registra en Palma de Mallorca, donde los paneles solares generan 18,35 kWh diarios. Esta producción representa un incremento de autonomía de algo más de un día, equivalente al 42 % del consumo diario.

Por otro lado, durante el verano, la producción mínima se observa en Bata (Guinea Ecuatorial), con 28,53 kWh diarios, lo que permitiría extender la autonomía en aproximadamente dos días, cubriendo cerca del 65 % del consumo diario.

En zonas como La Valeta (Malta), durante el verano, la producción solar es tan elevada que se acerca al consumo diario, permitiendo una operación casi indefinida si las condiciones climáticas son favorables.

4.4.4 Circuito eléctrico

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de la distribución del sistema eléctrico de la plataforma, con el objetivo de verificar que la capacidad de generación, almacenamiento y distribución de energía es suficiente para abastecer todos los sistemas a bordo durante el tiempo de operación esperado.

El sistema eléctrico ha sido diseñado para garantizar eficiencia, seguridad y redundancia, permitiendo el funcionamiento continuo de la plataforma incluso en caso de fallos en alguno de sus componentes clave. A continuación, se describen los elementos principales del sistema:

- Almacenamiento de energía: la plataforma cuenta con dos bancos de baterías LiFePO₄, ubicados en cada casco, lo que permite una mejor distribución del peso y una mayor seguridad en caso de fallos parciales del sistema.
- Generación de energía: se han integrado paneles solares que suministran energía al sistema a través de reguladores MPPT, optimizando la captación y gestión de la energía generada.

- Redundancia energética: el sistema ha sido diseñado con un esquema de redundancia, de manera que la plataforma pueda continuar operando en caso de fallo de uno de los motores o de una parte del sistema de generación eléctrica.
- Monitorización y control: se ha implementado un sistema de gestión y supervisión Victron, que permite el control en tiempo real de la producción solar, el estado de carga de las baterías y el consumo de los distintos dispositivos eléctricos.
- Protecciones eléctricas: el sistema incorpora fusibles, disyuntores y dispositivos de protección para evitar sobrecargas, cortocircuitos y otros fallos que puedan comprometer la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema.

Los cálculos realizados han demostrado que la capacidad de las baterías y el flujo energético permiten mantener en funcionamiento todos los sistemas esenciales de la plataforma durante el tiempo de operación previsto. Además, la integración de paneles solares proporciona un extra de autonomía, reduciendo la dependencia de fuentes externas de recarga y mejorando la eficiencia operativa.

4.5 Presupuesto

El presupuesto de este proyecto, que se encuentra en el Anexo X: Presupuesto, contempla los costos de los componentes principales de la plataforma, así como los gastos asociados a la construcción, ensamblaje y pruebas.

- Sistemas principales: incluye los motores eléctricos, la estación de recarga, las baterías y las protecciones necesarias para la operatividad de la plataforma.
- Estructura contempla el coste del casco en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en estructura monolítica. Se emplearán paneles de sándwich con dos pieles para la subdivisión interior.
- Sistemas de energía y almacenamiento: considera el costo de las placas solares, los reguladores MPPT y los inversores de corriente.
- Sistemas de navegación y comunicaciones: incluye sensores de navegación, GPS y sistemas de comunicación para garantizar la operatividad autónoma.
- Mano de obra y ensamblaje: se estima un costo de fabricación y montaje que cubre los procesos de construcción y ensamblaje de la plataforma.
- Pruebas y certificaciones: se destina un presupuesto para la validación técnica de los sistemas y pruebas en entornos reales.

El presupuesto total estimado del proyecto es de 510.104,00 €, lo que cubre todos los elementos esenciales para la construcción y validación de la plataforma.

4.6 Comparación con expectativas iniciales

Los resultados obtenidos confirman que el diseño propuesto cumple con los requisitos establecidos, destacando los siguientes aspectos clave:

- La plataforma garantiza una autonomía mínima de tres días con las baterías, con la posibilidad de extender su operación gracias al sistema de paneles solares.
- Los cálculos han demostrado que la capacidad instalada de generación, almacenamiento y distribución de energía es suficiente para abastecer todos los sistemas a bordo.
- Los valores obtenidos del \overline{GM} transversal, con un resultado de 18,10 metros, confirman que la plataforma ofrece una estabilidad significativamente superior a la de un monocasco, mejorando su seguridad y desempeño en el mar.

Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se identificaron algunos desafíos importantes:

- La necesidad de instalar paneles solares ha influido significativamente en las dimensiones de la plataforma, aumentando su superficie para garantizar una producción energética suficiente.
- Si la plataforma no dependiera de energía solar, el catamarán podría haberse diseñado con la mitad de su tamaño actual, lo que implicaría menos peso, menor resistencia al avance y una mayor maniobrabilidad.

4.7 Implicaciones de los resultados

Los resultados obtenidos permiten extraer una serie de conclusiones sobre el impacto del diseño y su viabilidad operativa:

- La funcionalidad de la plataforma ha sido validada, demostrando que es capaz de cumplir con los objetivos establecidos para su operación.
- La eficiencia energética del sistema queda confirmada, asegurando un rendimiento óptimo.
- La inclusión de paneles solares representa una ventaja significativa, ya que permite aumentar la autonomía operativa y reducir la dependencia de recargas externas, lo que puede ser clave en misiones de larga duración. Sin embargo, en función del uso real de la plataforma, también se podrá estudiar la optimización del sistema energético, evaluando la posibilidad de reducir la cantidad de paneles o incluso prescindir de ellos si otras soluciones energéticas frente a su tamaño resultan más eficientes para determinados escenarios.

Estos aspectos refuerzan la viabilidad del diseño y abren la puerta a futuras optimizaciones para mejorar su desempeño en diferentes aplicaciones.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El desarrollo de esta plataforma ha permitido demostrar la viabilidad de un sistema autónomo de recarga de drones en el ámbito naval. Su diseño ha confirmado que la solución es técnicamente factible y operativamente eficiente. Si bien su integración óptima se prevé en buques anfibios, su potencial en operaciones navales abre nuevas oportunidades estratégicas, especialmente en el ámbito de la guerra anfibia, un área de gran relevancia para la estrategia militar de España. Además, el diseño ofrece margen para futuras optimizaciones de tamaño del catamarán, tanto en disminución como ampliación en función de las necesidades operativas específicas de recarga solar, garantizando su versatilidad en diferentes escenarios.

Uno de los principales aciertos en el diseño ha sido la selección de un catamarán en lugar de un monocasco. Esta elección ha demostrado ser la mejor opción, ya que ha permitido reducir la resistencia al avance, mejorar la estabilidad y aumentar el espacio disponible en la plataforma. Estas ventajas han sido claves para la integración del sistema de recarga de drones y la distribución de los distintos componentes eléctricos y estructurales.

El análisis de los componentes empleados en el diseño ha demostrado que existen elementos adaptados al entorno marino que cumplen con las expectativas, confirmando que el problema no radica en la incorporación de estos elementos al ámbito marítimo, sino en la necesidad de optimizar su integración y distribución en la plataforma.

Un aspecto clave del proyecto ha sido la generación de energía mediante paneles solares. Se ha comprobado que, en las regiones donde España tiene intereses estratégicos, la elevada irradiación solar hace que esta tecnología sea una alternativa especialmente atractiva. No obstante, con las tecnologías actuales, el número de paneles necesarios puede suponer un desafío en términos de integración y optimización del espacio. En el futuro, la mejora en la eficiencia de las placas solares y el desarrollo de soluciones híbridas podrían optimizar el equilibrio entre autonomía energética, peso y dimensiones, aumentando la viabilidad y versatilidad del sistema.

El uso de drones en conflictos modernos ha demostrado ser un elemento clave en la evolución de la guerra, lo que refuerza la relevancia de este tipo de plataformas. Ampliar la autonomía de los drones y contar con una base naval autónoma más cerca del enemigo ofrece una ventaja táctica considerable.

Por otro lado, la plataforma no solo plantea una solución de recarga, sino que mejora la capacidad operativa de los drones gracias a la implementación de un sistema de cambio de batería en lugar de recarga inalámbrica. Esta solución, aunque supone un mayor consumo energético, permite minimizar los tiempos de espera entre vuelos a tan solo 80 segundos, asegurando una mayor frecuencia de

operaciones y optimizando la utilización de los drones. Además, mientras los drones están en vuelo, el sistema continúa cargando las baterías de repuesto, lo que maximiza la disponibilidad de unidades listas para el despliegue.

5.2 Líneas futuras

El proyecto abre diversas líneas de investigación y mejora que podrían optimizar su funcionalidad y adaptabilidad a distintos escenarios:

1. Expansión del sistema para la recarga de drones submarinos y drones navales de superficie, explorando su viabilidad y las adaptaciones necesarias para su implementación en distintos tipos de vehículos autónomos.
2. Pruebas en entornos reales, evaluando el comportamiento de la plataforma en diferentes condiciones marítimas y operativas para validar su rendimiento y detectar posibles mejoras.
3. Integración con otros sistemas navales, permitiendo la interoperabilidad con buques de la Armada y otras plataformas autónomas, facilitando su adopción en escenarios operativos reales.
4. Optimización del tamaño y peso de la plataforma, considerando alternativas híbridas que combinen recarga solar con otros sistemas de generación energética, además de la optimización del número de paneles solares en función de las necesidades reales de recarga.
5. Avances en eficiencia energética, con la incorporación de paneles solares de nueva generación que ofrezcan mayor rendimiento con menor superficie requerida.
6. Incorporación de inteligencia artificial, explorando cómo la automatización y el aprendizaje automático podrían optimizar el rendimiento de la plataforma y mejorar la toma de decisiones en tiempo real.
7. Desarrollo de un sistema de comunicaciones avanzado, estudiando las necesidades de comunicación entre la plataforma y el buque nodriza para asegurar un control estable y eficiente.
8. Evaluación de los sistemas de navegación, considerando la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la autonomía operativa y la precisión en la navegación.
9. Estudio de la viabilidad de una versión sin paneles solares, analizando cómo la eliminación de estos sistemas podría reducir el tamaño y mejorar la maniobrabilidad de la plataforma en ciertos escenarios.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Giorgio, N. Krznar y M. Pranjić, «A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms,» *Department of Robotics and Production System Automation, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 10000 Zagreb, Croatia*, 2022.
- [2] F. Supervielle, «Federico Supervielle,» [En línea]. Available: <https://www.fsupervielle.com/post/estudio-drones-submarinos-uuv>. [Último acceso: 05 febrero 2025].
- [3] D. Montoya Roldan y D. Massa Rueda, «Drones en la vanguardia: Tecnologías avanzadas redefiniendo la guerra moderna,» Universidad de Granada, 2023.
- [4] M. Aissi, Y. Moumen, J. Berrich, T. Bouchentouf, M. Bourhaleb y M. Rahmoun, «Autonomous solar USV with an automated launch and recovery system for UAV: State of the art and Design,» *2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, pp. 1-6, 2020.
- [5] P. Balladares, A. Bustos-Estrella, G. Albuja y M. Alarcón, «Avances en tecnologías de drones militares,» *Athenea Engineering sciences journal*, vol. 5, n° 18, pp. 7-18, 2024.
- [6] 조세연, «Conceptual Design of Electric Propulsion Vertical Takeoff and Landing Aircraft for Surveillance and Reconnaissance Operations with an Unmanned Ship,» 서울대학교 대학원, 2024.
- [7] I. Bae y J. Hong, «Survey on the developments of unmanned marine vehicles: intelligence and cooperation,» *Sensors*, vol. 23, n° 10, 2023.
- [8] M. Bálint, «History, Types, Application and Control of Drones,» *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, n° 3, 2022.
- [9] D. Hunt, «World War 1 History: The Kettering Bug—World's First Drone,» 2023. [En línea]. Available: <https://owlcation.com/humanities/World-War-1-History-The-Kettering-Bug-Worlds-First-Flying-Bomb>. [Último acceso: 25 Marzo 2025].
- [10] J. Kaag y S. Kreps, «Drones and democratic peace,» *Brown J. World Aff.*, vol. 19, p. 97, 2012.

- [11] J. Villasenor, «“Drones” and the future of domestic aviation,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, n° 3, pp. 235-238, 2014.
- [12] «BAE SYSTEMS,» [En línea]. Available: <https://www.baesystems.com/en/heritage/dehavilland-tiger-moth---queen-bee>. [Último acceso: 05 febrero 2025].
- [13] J. D. Blom, *Unmanned aerial systems: A historical perspective*, Combat Studies Institute Press Fort Leavenworth, KS, 2010.
- [14] M. N. Mirza, I. H. Qaisrani, L. A. Ali y A. Ali Naqvi, «Unmanned Aerial Vehicles: A Revolution in the Making,» *South Asia Studies*, vol. 31, n° 2, pp. 243-256, 2016.
- [15] W. J. Boyne, «How the Predator grew teeth,» *Air Force Magazine*, vol. 92, n° 7, pp. 42-45, 2009.
- [16] «Airce Force,» [En línea]. Available: <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/article/104469/mq-1b-predator/>. [Último acceso: 05 febrero 2025].
- [17] A. Petrovski, M. Radovanovic y A. Behlic, «Application of drones with artificial intelligence for military purposes,» de *10th International Scientific Conference od Defensive Technologies (OTEH)*, 2022, pp. 92-100.
- [18] A. Y. Martin, «Unmanned maritime vehicles: Technology evolution and implications,» *Marine Technology Society Journal*, vol. 47, n° 5, pp. 72-83, 2013.
- [19] R. Yan, S. Pang, H.-b. Sun y Y. Pang, «Development and missions of unmanned surface vehicle,» *Journal of Marine Science and Application*, vol. 9, pp. 451-457, 2010.
- [20] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu y C. Yuan, «Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges,» *Annual Reviews in Control*, vol. 41, pp. 71-93, 2016.
- [21] F. Liu, H. Tang, Y. Qin, C. Duan, J. Luo y H. Pu, «Review on fault diagnosis of unmanned underwater vehicles,» *Ocean Engineering*, vol. 243, p. 110290, 2022.
- [22] M. Arjomandi, S. Agostino, M. Mammone, M. Nelson y T. Zhou, «Classification of unmanned aerial vehicles,» *Report for Mechanical Engineering class, University of Adelaide, Adelaide, Australia*, pp. 1-48, 2006.
- [23] S. A. H. a. O. N. Q. H. Mohsan, Y. Li, M. H. Alsharif y M. A. Khan, «Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends,» *Intelligent Service Robotics*, vol. 16, n° 1, pp. 109-137, 2023.
- [24] E. Torun, «UAV Requirements and design consideration,» *Advances in Vehicle Systems Concepts and Integration*, p. 108, 2000.
- [25] X. Bai, B. Li, X. Xu y Y. Xiao, «A review of current research and advances in unmanned surface vehicles,» *Journal of Marine Science and Application*, vol. 21, n° 2, pp. 47-58, 2022.
- [26] J. E. Manley, «Unmanned surface vehicles, 15 years of development,» de *OCEANS 2008*, IEEE, 2008, pp. 1-4.
- [27] N. Agarwala, «Integrating UUVs for naval applications,» *Maritime Technology and Research*, vol. 4, n° 3, 2022.
- [28] J. Li, G. Zhang, C. Jiang y W. Zhang, «A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions,» *Ocean Engineering*, vol. 285, p. 115359, 2023.

- [29] I. Mendialdua Landecho, «Diseño de una estación base de recarga de drones,» Universidad Pontificia de Comillas ICAI, Madrid, 2022.
- [30] M. Khalid, F. Ahmad, B. K. Panigrahi y L. Al-Fagih, «A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery,» *Journal of Energy Storage*, vol. 53, p. 105084, 2022.
- [31] «Tecmundo,» [En línea]. Available: <https://www.tecmundo.com.br/drones>. [Último acceso: 4 Marzo 2025].
- [32] M. N. Nyanya, H. B. Vu, A. Schönborn y A. I. Ölçer, «Wind and solar assisted ship propulsion optimisation and its application to a bulk carrier,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101397, 2021.
- [33] R. Hine, S. Willcox, G. Hine y T. Richardson, «The wave glider: A wave-powered autonomous marine vehicle,» de *OCEANS 2009*, IEEE, 2009, pp. 1-6.
- [34] G. Minak, «Solar Energy-Powered Boats: State of the Art and Perspectives,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, nº 8, p. 1519, 2023.
- [35] A. Roy, F. Auger, F. Dupriez-Robin, S. Bourguet y Q. T. Tran, «Electrical power supply of remote maritime areas: A review of hybrid systems based on marine renewable energies,» *Energies*, vol. 11, nº 7, p. 1904, 2018.
- [36] J. Manley y S. Willcox, «The wave glider: A persistent platform for ocean science,» *OCEANS'10 IEEE SYDNEY*, pp. 1-5, 2010.
- [37] D. Maradin, «Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization,» *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 11, nº 3, pp. 176-183, 2021.
- [38] X. Hua, A. Thomas y K. Shultis, «Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness,» *Science Progress*, vol. 104, nº 1, 2021.
- [39] F. García-Córdova y A. Guerrero-González, «Intelligent navigation for a solar powered unmanned underwater vehicle,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, nº 4, p. 185, 2013.
- [40] S. Puig de la BellacasaVallejo, «Movilidad sostenible marítima: los barcos solares,» Universidad Pontificia de Comillas ICADE, Madrid, 2022.
- [41] «Newsweek,» [En línea]. Available: <https://www.newsweek.com/google-tests-solar-powered-internet-drones-421561>. [Último acceso: 05 febrero 2025].
- [42] E. Rabo, «Design of a solar powered recreational passenger boat,» BEng Marine Engineering, 2021.
- [43] R. Parthiban y P. Ponnambalam, «An enhancement of the solar panel efficiency: a comprehensive review,» *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, p. 937155, 2022.
- [44] «Actinnovation,» [En línea]. Available: <https://www.actinnovation.com/>. [Último acceso: 4 Marzo 2025].
- [45] K. Y. Yap, H. H. Chin y J. J. Klemes, «Solar Energy-Powered Battery Electric Vehicle charging stations: Current development and future prospect review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112862, 2022.

- [46] N. Wassiliadis, J. Schneider, A. Frank, L. Wildfeuer, X. Lin, A. Jossen y M. Lienkamp, «Review of fast charging strategies for lithium-ion battery systems and their applicability for battery electric vehicles,» *Journal of energy storage*, vol. 44, p. 103306, 2021.
- [47] «DJI,» [En línea]. Available: <https://www.dji.com/es/media-center/announcements/dji-release-new-protable-power-stations-es>. [Último acceso: 05 febrero 2025].
- [48] «Universidad Naval México,» [En línea]. Available: <https://www.uninav.edu.mx/uninav-semar/conocimientosMarineros/tema1/contenido2.html>. [Último acceso: 24 Marzo 2025].
- [49] P. Carrasco Pena, «Apuntes teoría del buque: Moovi,» [En línea]. Available: <https://moovi.uvigo.gal/course/view.php?id=24415>. [Último acceso: 2025 Marzo 11].
- [50] E. V. Lewis, «Principles of naval architecture second revision,» *The society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 1, 1988.
- [51] E. C. Tupper, *Introduction to naval architecture*, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [52] R. B. Zubaly, *Applied naval architecture*, Schiffer+ ORM, 2009.
- [53] J. R. Marín López, «Análisis de la estabilidad de catamaranes,» 2009.
- [54] J. Cervera Castrillo, «Estudio y optimización de los cascos usados en la propulsión eléctrica,» *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2023.
- [55] E. Sugianto, J.-H. Chen y N. V. A. Permadi, «Effect of monohull type and catamaran hull type on ocean waste collection behavior using openfoam,» *Water*, vol. 14, n° 17, p. 2623, 2022.
- [56] L. Zan, H. Sun, S. Lu, J. Zou y L. Wan, «Experimental study on porpoising of a high-speed planing trimaran,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, n° 4, p. 769, 2023.
- [57] B. Zhao, H. Jiang, J. Sun y D. Zhang, «Research on the hydrodynamic performance of a pentamaran in calm water and regular waves,» *Applied Sciences*, vol. 13, n° 7, p. 4461, 2023.
- [58] P. Renaud, M. Sacher y Y.-M. Scolan, «Multi-objective hull form optimization of a SWATH configuration using surrogate models,» *Ocean engineering*, vol. 256, p. 111209, 2022.
- [59] A. O. Elaghabash, «A CFD study of the resistance behavior of a planing hull in restricted waterways,» *Sustainable Marine Structures*, vol. 3, n° 1, pp. 32-55, 2021.
- [60] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [61] J. L. Kirtley, A. Banerjee y S. Englebretson, «Motors for ship propulsion,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n° 12, pp. 2320-2332, 2015.
- [62] N. Arish, M. Kamper y R. Wang, «Advancements in electrical marine propulsion technologies: A comprehensive overview,» *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 116, n° 1, pp. 14-29, 2024.
- [63] A. Capone, F. Alves Pereira y F. Di Felice, «Flow and cavity measurements in a supercavitating propeller,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, n° 2, p. 243, 2024.
- [64] Z. Liu, Z. Sun, G. Zhang y Y. Sun, «Study on thrust directional steadiness of cycloidal propeller,» *Ocean Engineering*, vol. 287, p. 115840, 2023.

- [65] R. Zubiaga, «Nuevo método de comparación,» *Revista técnica de la asociación de ingenieros navales*, n° 58, pp. 252-262, 1934.
- [66] «ITTC,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ittc.info/media/10176/75-02-02-021.pdf>. [Último acceso: 2025 Marzo 11].
- [67] «ePropulsion,» [En línea]. Available: <https://epropulsion.uk/products/g-series-batteries>. [Último acceso: 2025 Febrero 10].
- [68] «Hextronics,» [En línea]. Available: <https://hextronics.com/>. [Último acceso: 4 Marzo 2025].
- [69] B. Ramasubramanian, S. Sundarrajan, V. Chellappan, M. Reddy, S. Ramakrishna y K. Zaghbi, «Recent development in carbon-LiFePO₄ cathodes for lithium-ion batteries: a mini review,» *Batteries*, vol. 8, n° 10, p. 133, 2022.
- [70] M. Oproescu, N. Bizon, A. G. Mazare y M.-S. Raboaca, «Power requirement for maritime transport with ships powered from hybrid zero-emission system,» *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*, vol. 10, n° 2, pp. 1-8, 2025.
- [71] G. E. Vega Flores, «Estudio de prefactibilidad técnica conceptual de una embarcación autónoma propulsada por energía solar,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2020.
- [72] M. A. Eltawil y Z. Zhao, «MPPT techniques for photovoltaic applications,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 25, pp. 793-813, 2013.
- [73] M. Ahmad, A. Numan y D. Mahmood, «A comparative study of perturb and observe (P&O) and incremental conductance (INC) PV MPPT techniques at different radiation and temperature conditions,» *Eng. Technol. J*, vol. 40, n° 2, pp. 376-385, 2022.
- [74] «Victron energy,» [En línea]. Available: <https://www.victronenergy.com.es/>. [Último acceso: 4 Marzo 2025].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

El desarrollo de la plataforma naval autónoma para la recarga de drones aéreos conlleva importantes implicaciones en los ámbitos social, económico y ambiental, alineadas con los objetivos del proyecto descritos previamente en el documento.

Desde el punto de vista social, la implementación de esta tecnología mejora la eficiencia en misiones de vigilancia y reconocimiento en el ámbito marítimo. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la autonomía extendida de los drones permite su uso en operaciones de seguridad, búsqueda y rescate, reduciendo la necesidad de intervención humana y mejorando la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia.

En el ámbito económico, el uso de plataformas autónomas como la diseñada en este TFG contribuye a la reducción de costes operativos. La eliminación de infraestructura de recarga terrestre o embarcaciones tripuladas para este fin optimiza los recursos disponibles y fomenta la inversión en tecnologías de energía renovable y movilidad autónoma, aspectos analizados en el estudio de balance energético del sistema.

Desde una perspectiva ambiental, el uso de energía solar fotovoltaica (descrito en el apartado de generación y almacenamiento de energía) minimiza el impacto ambiental de la plataforma al reducir la dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, como se discutió en la evaluación de la batería, el reciclaje y la gestión de los materiales de las baterías LiFePO₄ deben considerarse para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo y uso de plataformas autónomas para la recarga de drones aéreos plantea una serie de consideraciones éticas y sociales que han sido abordadas a lo largo del trabajo.

Uno de los principales puntos de reflexión es el impacto en la automatización de tareas tradicionalmente realizadas por personal humano. Como se ha mencionado en la sección de operatividad, la plataforma reduce la necesidad de intervención humana en el mantenimiento y recarga de drones, lo que implica ventajas en términos de seguridad, pero también desafíos en términos de empleabilidad y toma de decisiones autónomas en entornos dinámicos.

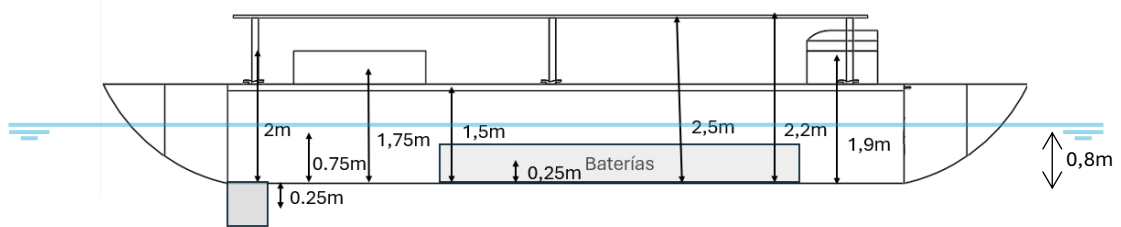
En términos de privacidad y regulación, el uso de drones en operaciones prolongadas puede generar inquietudes sobre la vigilancia en aguas internacionales y la regulación del espacio aéreo compartido, temas que requieren el desarrollo de marcos normativos adecuados.

Finalmente, desde una perspectiva ética y ambiental, este proyecto refuerza la importancia de la sostenibilidad en el desarrollo tecnológico, destacando el empleo de energía renovable y la optimización del consumo energético como factores clave en la reducción del impacto ecológico de las operaciones marítimas autónomas.

ANEXO III: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

Comparación de la estabilidad entre catamarán y monocasco mediante el cálculo de \overline{GM}

Para analizar la estabilidad de la plataforma y evaluar su comportamiento frente a una embarcación convencional, se ha realizado un cálculo del \overline{GM} (altura metacéntrica) comparando un catamarán con un monocasco de igual eslora y manga bajo el agua.



El cálculo de \overline{KB} (distancia desde la quilla al centro de carena) se realiza considerando el casco como un volumen de forma rectangular para simplificar el proceso. Con un calado de 0,8 m, el centro de carena se encuentra a la mitad de este valor, por lo que $\overline{KB} = 0,4$ m. Dado que ambos barcos presentan el mismo calado y una geometría sumergida equivalente para efectos comparativos, \overline{KB} es igual para los dos casos.

Elemento	Peso (kg)	Cantidad	Peso total (kg)	\overline{KG} (m)	$\overline{KG} \times \text{Peso}$ (mkg)
Casco	800,00	2,00	1600,00	0,75	1200,00
Baterías	100,00	14,00	1400,00	0,25	350,00
Recarga	31,75	2,00	63,50	1,90	120,65
Auxiliar	100,00	1,00	100,00	1,75	175,00
Motor	15,30	2,00	30,60	-0,25	-7,65
cubierta	400,00	1,00	400,00	1,50	600,00
PV	23,50	16,00	376,00	2,70	1015,20
Placa	400,00	1,00	400,00	2,50	1000,00
Columnas	27,00	6,00	162,00	2,00	324,00
Total			4532,10		4777,20

A continuación, se calcula el \overline{KG} (distancia desde la quilla al centro de gravedad). Para ello, se realizan aproximaciones del peso total de la embarcación, estimando la distribución de masas y considerando la contribución individual de cada uno de los elementos principales. Los valores de \overline{KG} de cada componente se muestran en la primera figura, donde se indica la posición de cada uno de los elementos que componen la plataforma. Además, en la tabla anterior se detallan los pesos asociados a cada componente junto con sus respectivas distancias \overline{KG} , así como los cálculos realizados para obtener el centro de gravedad total.

Por otro lado, se considera que todos los elementos auxiliares (como los equipos electrónicos, sistemas de control, etc.) están situados dentro de una caja ubicada en la parte trasera de la cubierta, a la que se asigna un peso aproximado coherente con el conjunto de la instalación.

$$\overline{KG} = \frac{\sum \overline{KG} \cdot w}{W} = \frac{4777,20}{4532,10} = 1,05\text{m}$$

Es importante destacar que el valor de \overline{KG} se ha considerado idéntico tanto para el catamarán como para el monocasco, dado que en este estudio comparativo se ha asumido que ambos barcos poseen la misma distribución de pesos y masas.

Por último, para determinar el valor del \overline{GM} , se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}$$

Antes de calcular el \overline{GM} , es necesario obtener el valor de \overline{BM} (radio metacéntrico), que depende directamente de la geometría de la superficie de flotación de cada embarcación. El cálculo de \overline{BM} se realiza a partir del momento de inercia de la superficie sumergida, y es importante aclarar que existen dos tipos principales de \overline{BM} , en función del eje de giro considerado:

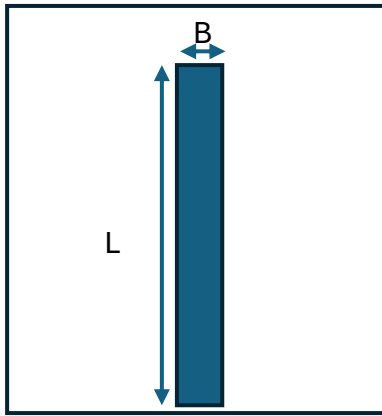
- \overline{BM} transversal, que se calcula usando el momento de inercia respecto al eje longitudinal de la embarcación. Este valor es el que determina la estabilidad frente a escoras laterales (bandazos).
- \overline{BM} longitudinal, que se calcula usando el momento de inercia respecto al eje transversal. Este valor es el que afecta a la estabilidad en cabeceos (proa-popa).

Por tanto, el valor de \overline{GM} también puede ser transversal o longitudinal, dependiendo de si se utiliza \overline{BM} transversal o \overline{BM} longitudinal en el cálculo. En este caso, se analiza la estabilidad transversal, por lo que se utiliza el \overline{BM} transversal, que se obtiene a partir del momento de inercia de la superficie de flotación respecto al eje longitudinal.

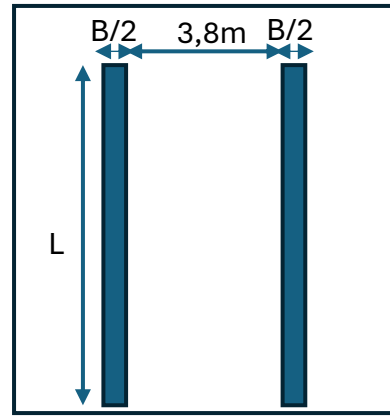
$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla}$$

Para calcular \overline{BM} , se analiza la forma de cada barco de manera independiente, ya que la geometría de la superficie sumergida del catamarán y del monocasco es diferente. Esta diferencia resulta clave, pues el catamarán, al tener los dos cascos separados y una mayor manga total, presenta un momento de inercia mucho mayor que el monocasco, lo que incrementa significativamente su \overline{BM} y, por tanto, su estabilidad transversal.

En la siguiente figura se muestra la comparación entre las áreas sumergidas de ambos barcos, representando gráficamente la diferencia en sus geometrías de flotación. Cada caso se calcula por separado, aplicando la fórmula correspondiente y considerando las dimensiones específicas de cada embarcación.



Superficie en el agua del monocasco



Superficie en el agua del catamarán

$$I_{trans} = \frac{1}{12} L \cdot B^3$$

$$I_{trans m} = \frac{1}{12} 14 \cdot 1,2^3 = 2,02m^4$$

$$I_{trans c} = \frac{1}{12} 14 \cdot 5^3 - 2 \cdot \frac{1}{12} 14 \cdot 0,6^3 = 81,82m^4$$

$$\overline{BM}_{trans m} = \frac{2,02}{4,42} = 0,46m$$

$$\overline{BM}_{trans c} = \frac{81,82}{4,42} = 18,50m$$

Una vez determinados los valores de \overline{KB} , \overline{BM} y \overline{KG} , se calcula el \overline{GM}_{trans} , parámetro que determina la estabilidad frente a escoras laterales, aplicando la fórmula previamente indicada:

$$\overline{GM}_{trans m} = 0,4 + 0,46 - 1,05 = -0,17m$$

$$\overline{GM}_{trans c} = 0,4 + 18,5 - 1,05 = 17,85m$$

En el caso del catamarán, el resultado es un \overline{GM}_{trans} de 18,10 m, lo que indica una altísima estabilidad. Por el contrario, para el monocasco, el \overline{GM} transversal es de -0,18 m, un negativo que refleja que el barco es inestable, de manera que no sería una opción viable.

Una vez analizada la estabilidad transversal, se procede al cálculo del \overline{GM} longitudinal, que permite evaluar la estabilidad de la embarcación frente a cabeceos (movimientos de proa a popa). Para obtener este valor, es necesario calcular previamente el \overline{BM} longitudinal, el cual depende del momento de inercia longitudinal de la superficie de flotación respecto al eje transversal.

Al igual que en el caso transversal, el cálculo del \overline{BM} longitudinal se realiza considerando de forma independiente las geometrías de flotación del catamarán y del monocasco, ya que sus formas sumergidas son diferentes. Esta magnitud es fundamental para determinar el comportamiento dinámico de la embarcación en situaciones de oleaje o aceleraciones longitudinales, afectando directamente al confort y a la seguridad de la plataforma durante la navegación.

$$I_{long} = \frac{1}{12} B \cdot L^3$$

$$I_{longm} = \frac{1}{12} 1,2 \cdot 14^3 = 274,4m^4 \quad I_{longc} = \frac{1}{12} 5 \cdot 14^3 - \frac{1}{12} 3,8 \cdot 14^3 = 274,4m^4$$

$$\overline{BM}_{longm} = \frac{274,4}{4,42} = 62,06m \quad \overline{BM}_{longc} = \frac{274,4}{4,42} = 62,06m$$

A continuación, se calcula el \overline{GM} longitudinal con el objetivo de analizar la estabilidad de la embarcación frente a movimientos de cabeceo (proa-popa). En este caso, se considera que los valores de \overline{BM} longitudinal son iguales para ambas configuraciones, ya que con respecto al través ambos barcos presentan la misma geometría sumergida. Esto se debe a que el desplazamiento o la separación de los cascos en el catamarán no afecta al momento de inercia longitudinal cuando el movimiento se produce en el plano longitudinal. Por tanto, aunque el catamarán esté formado por dos cascos independientes, su comportamiento longitudinal es equivalente al del monocasco.

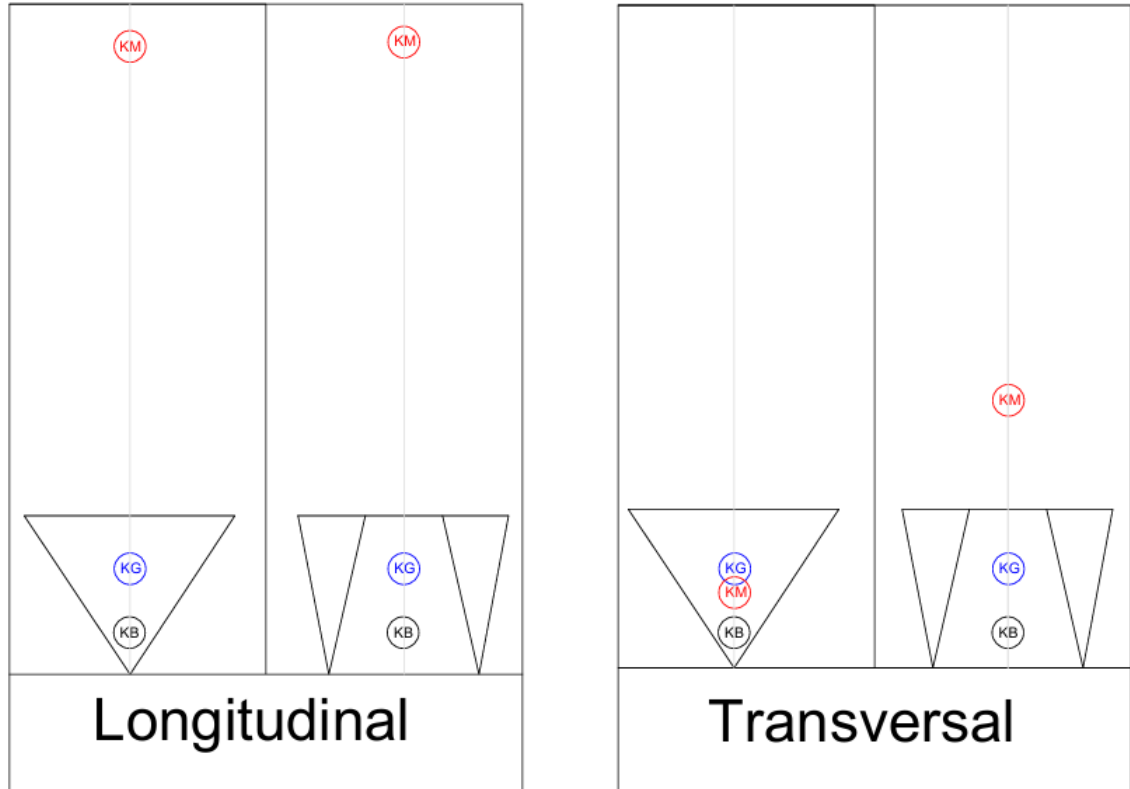
Una vez calculado el \overline{BM} longitudinal, se aplica junto con los mismos valores de \overline{KB} y \overline{KG} para obtener el \overline{GM} longitudinal en ambos casos. Como resultado, el valor de \overline{GM} longitudinal es igual para el catamarán y para el monocasco, ya que no existen diferencias geométricas que influyan en este cálculo en el plano longitudinal.

$$\overline{GM}_{longm} = 0,4 + 62,06 - 1,05 = 61,41m$$

$$\overline{GM}_{longc} = 0,4 + 62,06 - 1,05 = 61,41m$$

Del análisis realizado se observa que el \overline{GM} transversal del catamarán es significativamente mayor que el del monocasco. Con un valor de 18,10 m frente a los 0,056 m del monocasco, se pone de manifiesto la gran superioridad del catamarán en cuanto a estabilidad lateral. Este resultado indica que el catamarán presenta una resistencia mucho mayor frente a escoras laterales, garantizando una navegación más segura y estable incluso ante perturbaciones externas como oleaje o viento. Por el contrario, el monocasco muestra un \overline{GM} transversal extremadamente reducido, lo que refleja una estabilidad crítica, con riesgo de pérdida de equilibrio con ángulos de escora muy pequeños y una alta probabilidad de vuelco en condiciones adversas.

Por otro lado, en lo que respecta a la estabilidad longitudinal, los resultados muestran que tanto el catamarán como el monocasco presentan el mismo valor de \overline{GM} longitudinal. Esto se debe a que, al analizar el movimiento en el plano longitudinal (proa-popa), las diferencias geométricas entre ambos tipos de casco no afectan al cálculo del momento de inercia longitudinal. Por lo tanto, el comportamiento frente a cabeceos es similar en ambas configuraciones, sin que el diseño multicasco aporte ventajas adicionales en este aspecto.



Además de la clara ventaja en términos de estabilidad transversal, el catamarán también ofrece una mejora importante en cuanto al aprovechamiento del espacio. Para una misma superficie mojada, el catamarán permite disponer de una mayor superficie útil de cubierta y zona de trabajo, lo que resulta especialmente beneficioso para plataformas técnicas y operativas. Esto, a su vez, implica una menor resistencia al avance, ya que se consigue un aumento del volumen y del espacio disponible sin incrementar proporcionalmente la superficie en contacto con el agua, optimizando así el rendimiento hidrodinámico de la embarcación.

ANEXO IV: BASE DE DATOS DE CATAMARANES

Nombre	Manga (B) [m]	Eslora (L) [m]	Desplazamiento [ton]	Calado (T) [m]	Potencia Solar [kW]	Velocidad Crucero [kn]	Motores [kW]
Passeur & Passeur 2	3,5	10	6,5	0,9	1,2	4,0	10,0
Navalt12	3,5	12	15,0	0,6	6,0	7,0	250,0
Aditya	7,0	21	23,0	0,9	20,0	7,5	20,0
SolarCat	5,0	15	12,0	0,7	8,3	10,0	12,0
Navalt18	6,0	18	20,0	0,85	15,0	7,0	12,5
Sun21	6,6	14	12,0	1,0	10,0	5,0	8,0
PlanetSolar	16,0	31	105,0	2,2	93,6	5,0	20,0
Caramaran	5,5	14	14,0	0,9	9,45	4,0	8,0

Tabla IV- 1 Base de datos de catamaranes

ANEXO V: ESTUDIO CFD

A través de Autodesk CFD se ha realizado un estudio hidrodinámico del casco para comprobar principalmente la reacción en la zona entre cascos y determinar si la separación escogida es la correcta. El estudio se ha realizado a una velocidad de 5 nudos, lo que equivale aproximadamente a 257.2 cm/s, que es la unidad utilizada en la leyenda de la simulación.

En la Figura V- 1 de la izquierda se observa que la velocidad aumenta entre los cascos, lo cual es un comportamiento esperado debido al efecto Venturi, donde el flujo se acelera al pasar por una región más estrecha. No obstante, el incremento de velocidad en esta zona no es excesivo, lo que sugiere que la separación elegida es adecuada.

En la Figura V- 1, el casco se muestra desde la parte inferior. La entrada de agua se encuentra en la zona superior de la figura, y se puede observar que, a la salida, pegado al eje X detrás de los cascos, la velocidad disminuye. Esta reducción de velocidad puede indicar la presencia de una zona de recirculación o pérdida de energía cinética del fluido. Esto es un fenómeno normal y debe analizarse en términos de su impacto.

Además, como se observa en la imagen de la derecha, el flujo a la salida del casco se mantiene de manera laminar, lo que indica que el diseño es correcto y la separación entre los cascos no genera turbulencias significativas que afecten el rendimiento hidrodinámico.

Este análisis confirma que la separación entre los cascos es apropiada, ya que no genera un incremento significativo en la velocidad del flujo entre ellos. Si bien la disminución de la velocidad en la salida puede influir en la eficiencia hidrodinámica, se podría realizar un estudio más detallado para evaluar posibles optimizaciones en el diseño.

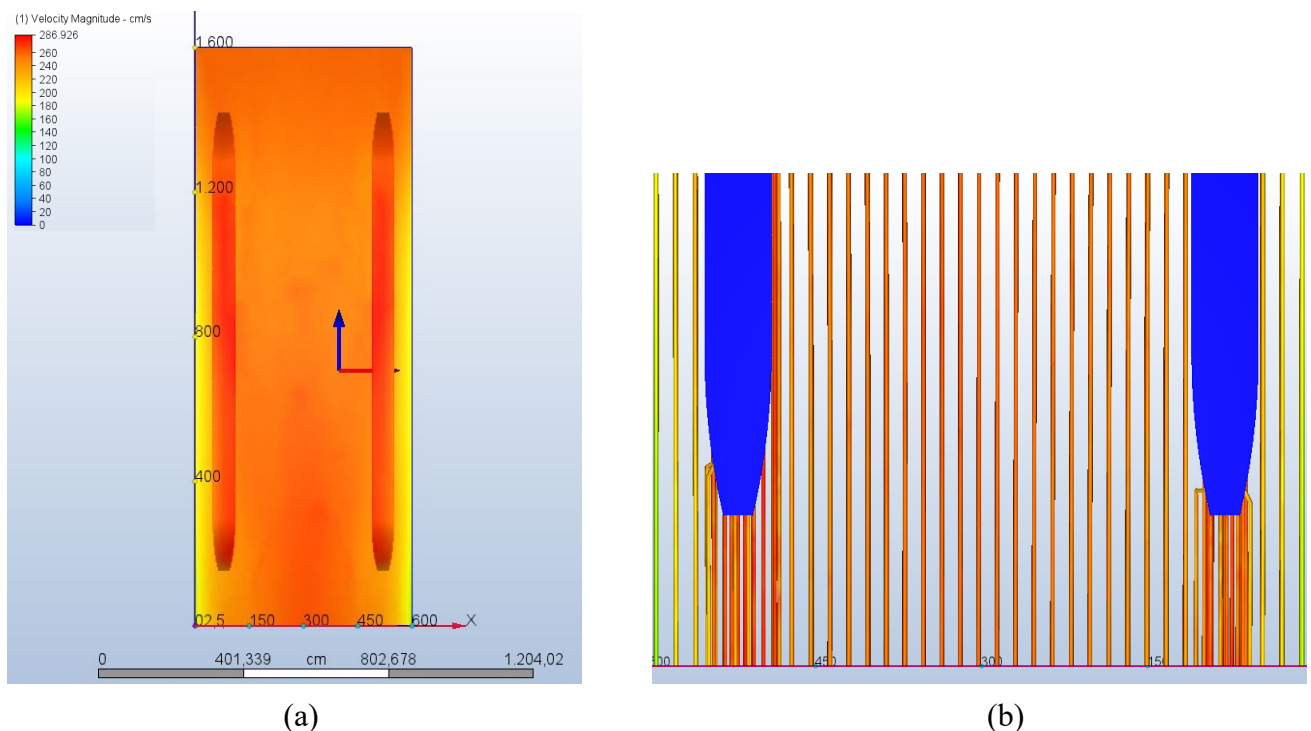
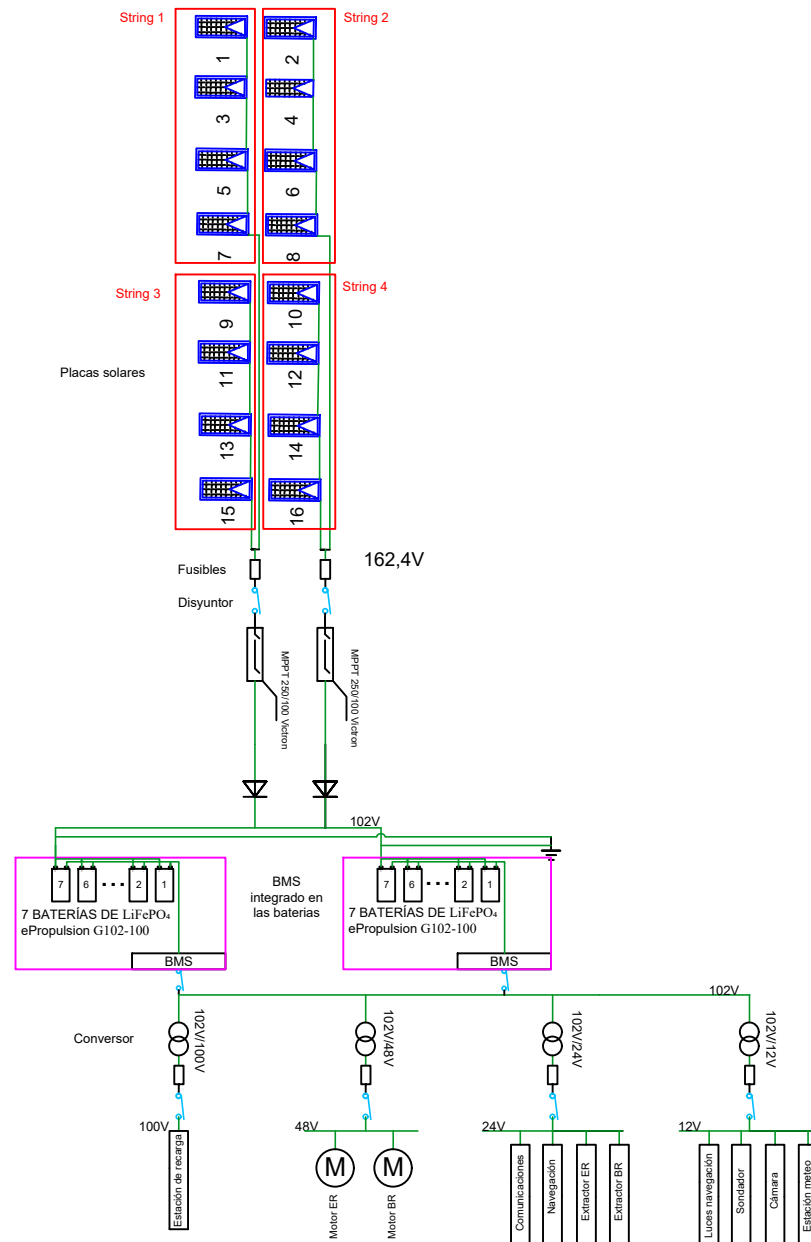


Figura V- 1 Estudio CFD con Autodesk CFD.

(a) Representación en planta de la plataforma catamarán, donde se visualiza el campo de velocidades del flujo de agua en torno a los cascos. (b) Visualización del flujo de salida en la sección de popa, mostrando las líneas de corriente que evidencian el comportamiento hidrodinámico y la interacción con los cascos.

ANEXO VI: UNIFILAR DE LA INSTALACIÓN



Notas

- Paneles solares: 16 unidades Trina Solar TSM-NEG18R.28 de 510W cada uno.
- Configuración: 4 strings de 4 paneles fotovoltaicos (PV) cada uno.
- Conexión: Cada dos strings están conectados en paralelo y acoplados a un MPPT Victron SmartSolar 250/100.
- Protección: A la salida del MPPT, se instala un diodo de no retorno para evitar el flujo inverso de energía que pueda dañar las placas solares.
- Almacenamiento: 14 baterías ePropulsion G102-100, equipadas con sistema de gestión de batería (BMS).
- Conversión de voltaje: Convertidores de 102V (salida de baterías) a 100V, 48V, 24V y 12V.


Leyenda

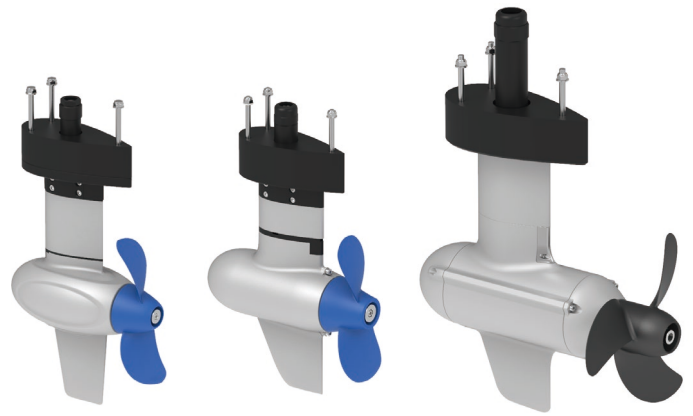


Plano unifilar Plataforma Recarga de drones	Autor: Fernando L G-M	Fecha 11/03/2025
Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético		Hoja 1/1

ANEXO VII: ESPECIFICACIONES DE FABRICANTE

Electric Pod Drives

-  Virtually Silent
-  Maintenance-Free
-  No Exhaust
-  No Greasy Dirt



Pod Drive 1.0 Evo
3HP

Pod Drive 3.0 Evo
6HP

Pod Drive 6.0 Evo
9.9HP

Direct-Drive

Direct drive motors don't require a gearbox to achieve the necessary torque, which means fewer moving parts and a simple mechanical structure. The advantages are smaller size, less noise and higher reliability.



Hydrogeneration

Capture the power your sailboat generates while being propelled by the wind. Hydrogeneration is a proven way to reduce or eliminate fossil-fuel charging while sailing.



Specs

	Pod Drive 1.0 Evo	Pod Drive 3.0 Evo	Pod Drive 6.0 Evo
Power	1kW / 3HP	3kW / 6HP	6kW / 9.9HP
Operation Voltage	48V (Input Range 39V - 60V)		
Weight	6.2 kg / 13.6 lbs	15.3 kg / 33.7 lbs	31kg / 70.4lbs
Propeller	11" x 5.8" 2-blade, composite propeller	10.2" x 6.7" 2-blade, composite propeller	12.6" x 8.7" 3-blade, aluminum propeller
Static Thrust	316 N / 71 lbs	590 N / 132.6 lbs	1000 N / 224.8 lbs
Rated RPM	1200 rpm	2300 rpm	1500 rpm
Hydrogeneration	✓	✓	✓

*Weight data includes the driver box.

Electric Pod Drives 3HP - 9.9HP

48V E-Series Lithium Battery

Original ePropulsion lithium battery made for Pod Drive Evo outboards.



E40 2kWh



E80 4kWh



E175 9kWh



Competitive Price
The unit price is as low as \$0.5 per watt-hour.



High Energy Density
70% less weight and space than lead-acid batteries.



Ultralong Lifespan
3000 cycles at 80% DOD.



ePropulsion Original
Data sync with ePropulsion outboards to apply smart operation strategy.

*The actual battery capacity varies slightly.

Evo Controls

You could always find a control that best fits your boat.



Evo Top Mount Control



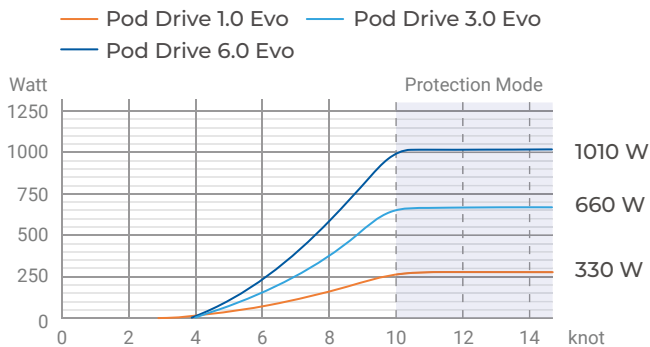
Evo Side Mount Control



Evo Dual Control

Hydrogeneration Output

Pod Drive Evo feature hydrogeneration and empower sailors to use renewable energy.



*The hydrogeneration data is based on real tests with the anti-ventilation plate installed.
*Pod Drive Evo is tested with the 12.6" x 8.7" three-blade aluminum propeller.

Safety Wristband

In the case of man overboard, the safety wristband will shut down Pod Drive immediately. Pod Drive can connect with up to 8 safety wristbands.



Performance Sheet

Pod Drive 1.0 Evo

The data is based on a 20ft sailboat with one person and one Spirit battery in calm lake water.

Power (W)	Speed (mph / kph)	Runtime (hh:mm)	Range (mile / km)
35	1.7 / 2.7	28:35	49.1 / 78.5
65	2.2 / 3.5	15:20	33.8 / 54.2
125	3.1 / 5	8:00	24.8 / 39.7
250	3.5 / 5.6	4:00	14 / 22.4
500	4.8 / 7.7	2:00	9.6 / 15.4
750	5 / 8	1:20	6.7 / 10.7
1000	5.5 / 8.9	1:00	5.5 / 8.9

Pod Drive 3.0 Evo

The data is based on a 24ft sailboat with one person and one E80 battery in calm lake water.

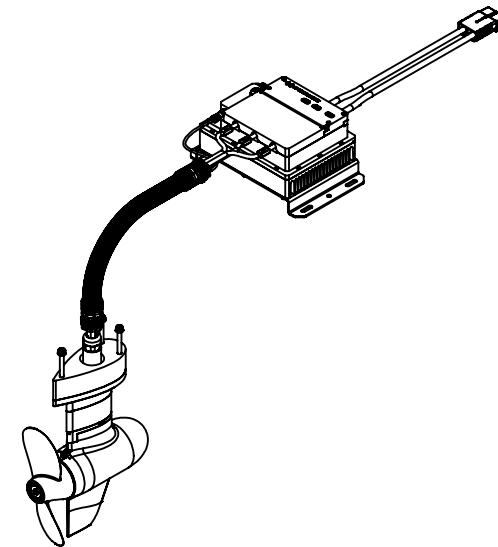
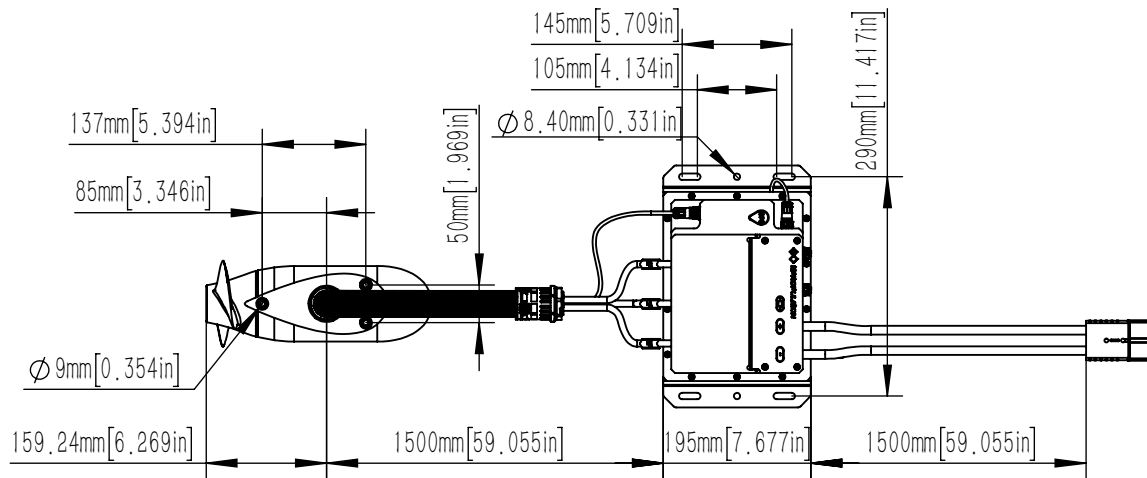
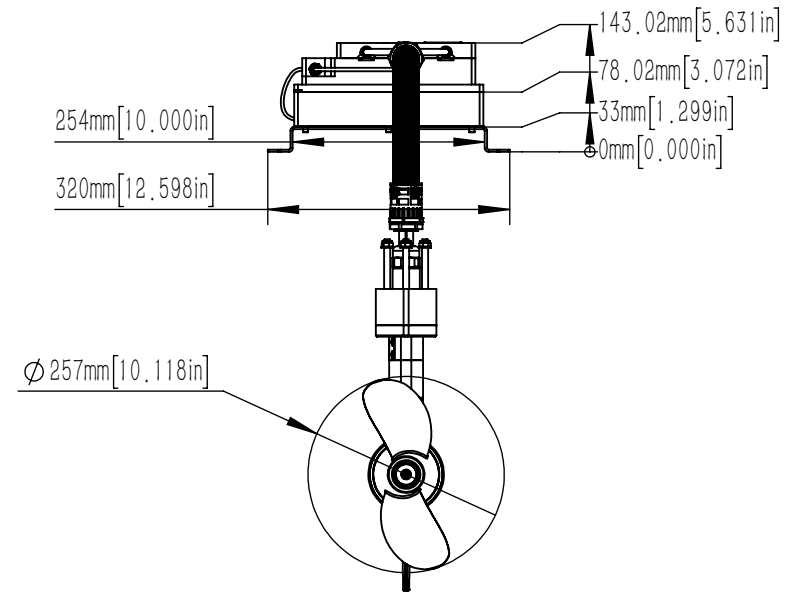
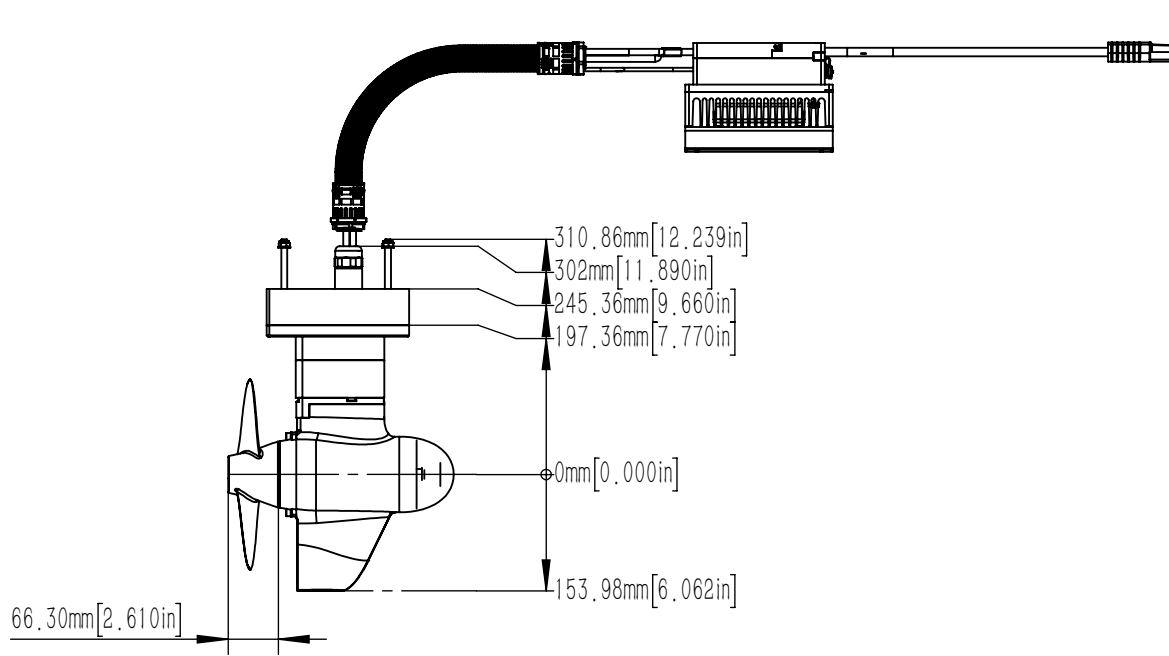
Power (W)	Speed (mph / kph)	Runtime (hh:mm)	Range (mile / km)
300	3.1 / 5	13:20	42.3 / 68.2
550	4 / 6.4	7:25	29.8 / 47.7
1000	4.7 / 7.6	4:00	18.8 / 30.4
1500	5.4 / 8.7	2:40	14.7 / 23.6
2000	6.1 / 9.8	2:00	12.2 / 19.5
2500	6.7 / 10.8	1:35	11 / 17.6
3000	7.2 / 11.6	1:20	9.8 / 15.7


Pod Drive 6.0 Evo

The data is based on a 30ft sailboat with one person and one E175 battery in calm lake water.

Power (W)	Speed (mph / kph)	Runtime (hh:mm)	Range (mile / km)
500	4 / 6.4	18:00	72 / 115
1000	4.9 / 7.6	9:00	44.1 / 70.6
2000	5.8 / 9.3	4:30	26.1 / 41.8
3000	6.5 / 10.5	3:00	19.5 / 31.2
4000	7.1 / 11.4	2:15	15.9 / 25.4
5000	7.6 / 12.2	1:50	13.6 / 21.8
6000	8 / 12.9	1:30	12 / 19.2

*The actual speed, range, and running time may vary because of different boats, load, weather and water conditions, etc.



			
Pod Drive 3.0 Evo			
Scale	1: 10	Version	V1.0



UNIVERSAL SPECS

PROPERTIES

DIMENSIONS - DOCK WITH CLOSED ROOF	1.07 M x 0.76 M x 0.31 M 42" X 30" X 12"
TOTAL WEIGHT - WITHOUT AIRCRAFT	31.75 KG 70 LBS
EXTERNAL MATERIAL	UV RESISTANT ABS
OPERATING TEMPERATURE	-20°C TO 50°C — -5°F TO 122°F
API COMMUNICATION	HTTPS OVER ETHERNET/CELLULAR
INPUT VOLTAGE	100 VAC - 240 VAC — 50 - 60 HZ
IDLE POWER CONSUMPTION	80 W
MAX POWER CONSUMPTION (HVAC)	650 W

HARDWARE

SUPPORTED AIRCRAFT	DJI MAVIC 3 SERIES (E/T/M) PARROT ANAFI AI ANAFI USA GOV / SE
PAYLOADS SUPPORTED BY DJI MAVIC 3	RTK, CCI MP10, JZ H1, CSDI GL10, JZ H1, JZ U3, 3RD PARTY
COOLING SYSTEM	COMPRESSOR BASED HVAC SYSTEM
HEATING SYSTEM	THERMORESISTIVE 200W
BATTERY STORAGE - C MODEL	60W MAGSAFE CHARGER
BATTERY STORAGE - CS MODEL	4 SLOTS USING FAST CHARGING INTERFACE CONNECTOR
RECONFIGURATION KITS	CONVERT UNIVERSAL UNIT'S CONFIGURATION FROM ONE DRONE TO



TRAY INSTALL/MOUNT HARDWARE

SOFTWARE

FLIGHT FLYTNOW AUTO+
SOFTWARE VOTIX
PROVIDERS USER-DEVELOPED

STATION SOFTWARE HEXTRONICS API

MODULAR ADD-ONS

BVLOS INSPECTS DRONE PRE-AND-POST FLIGHT
CAMERA KIT FOR BVLOS OPERATIONS

EDGE ON-BOARD SERVER FOR IMMEDIATE DATA
COMPUTE PROCESSING

CELLULAR 4G/5G CONNECTIVITY FOR
EXPANSION REMOTE/MOBILE INSTALLATIONS

PELICAN RUGGED ENCLOSURE FOR DEPLOYMENTS
CASE IN HARSH ENVIRONMENTS

CODES AND CERTIFICATIONS

HS CODE 8537.10.9090

SHOCK AND VIBRATION ISTA 1A (SELF-TESTED)

INGRESS PROTECTION RATING IP 56 TESTED

CERTIFICATIONS UL & CE TESTING PENDING

BLUE UAS NDAA COMPLIANT

WARRANTIES

HEXCARE+ LICENSE, UPGRADES, REGISTRATION



SET UP AND MAINTENANCE

SET UP

FLAT SURFACE WITH NO OBSTRUCTIONS OVERHEAD OR WITHIN A 2M RADIUS

MAINTENANCE

BI-ANNUAL MINIMUM, MONTHLY RECOMMENDED, BI-WEEKLY FOR OPTIMAL PERFORMANCE IN HARSHER CONDITIONS. OPERATION FREQUENCY AND ENVIRONMENT DEPENDENT.

PERFORMANCE

INTERNAL REGULATED TEMPERATURE

10°C TO 35°C — 50°F TO 95°F

UNOBSTRUCTED FLIGHT RADIUS

2.4 KM — 1.5 MI

OPERATING AREA

11.3 SQ KM — 7 SQMI

MAX OPERABLE WIND SPEED

20 KNOTS

PRECISION LANDING RANGE

+/- 15 CM — 6 IN

PRECISION LANDING RELIABILITY

~ 99.99%

BATTERY SWAPPING TIME

80 SECONDS

BATTERY SWAPPING RELIABILITY

> 99.99%

LIFSPAN

5 YEARS (DEPENDENT ON USE)

TRUCK BED COMPATIBILITY

TRUCK SPEED

UP TO 90 MPH

TAKEOFF AND LANDING

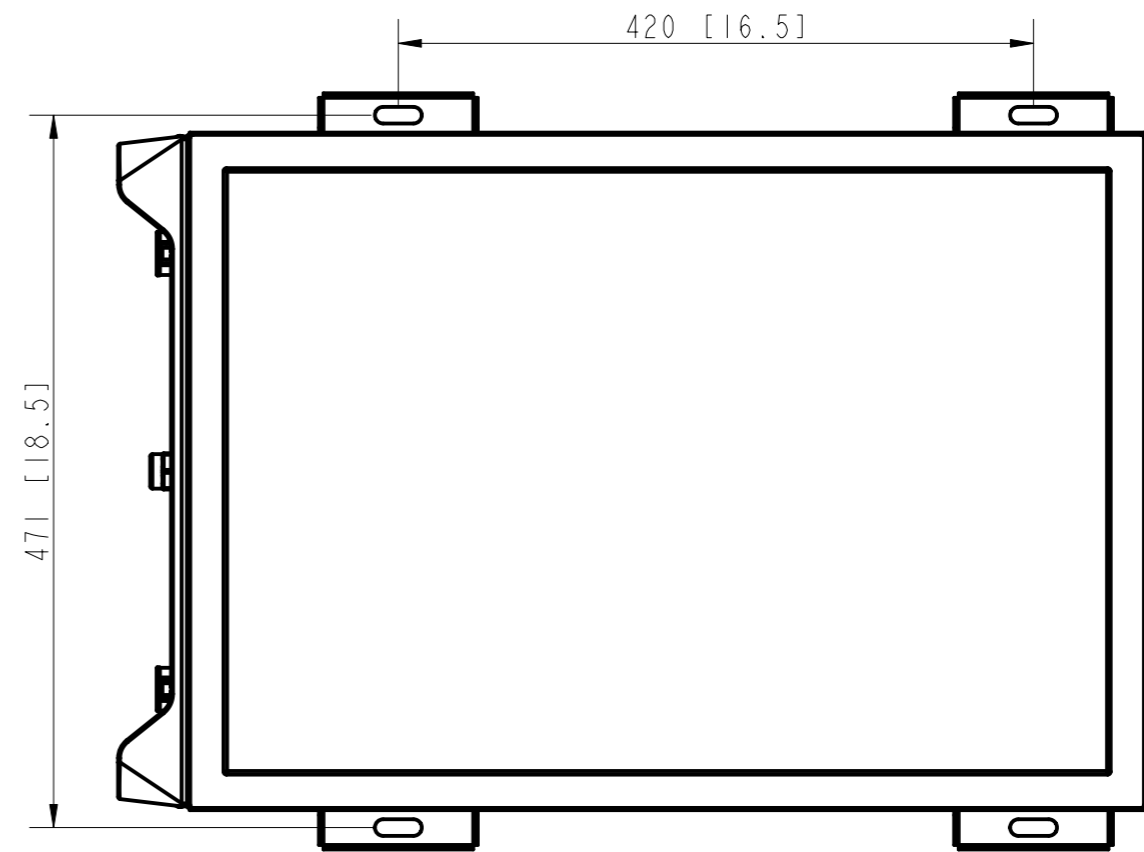
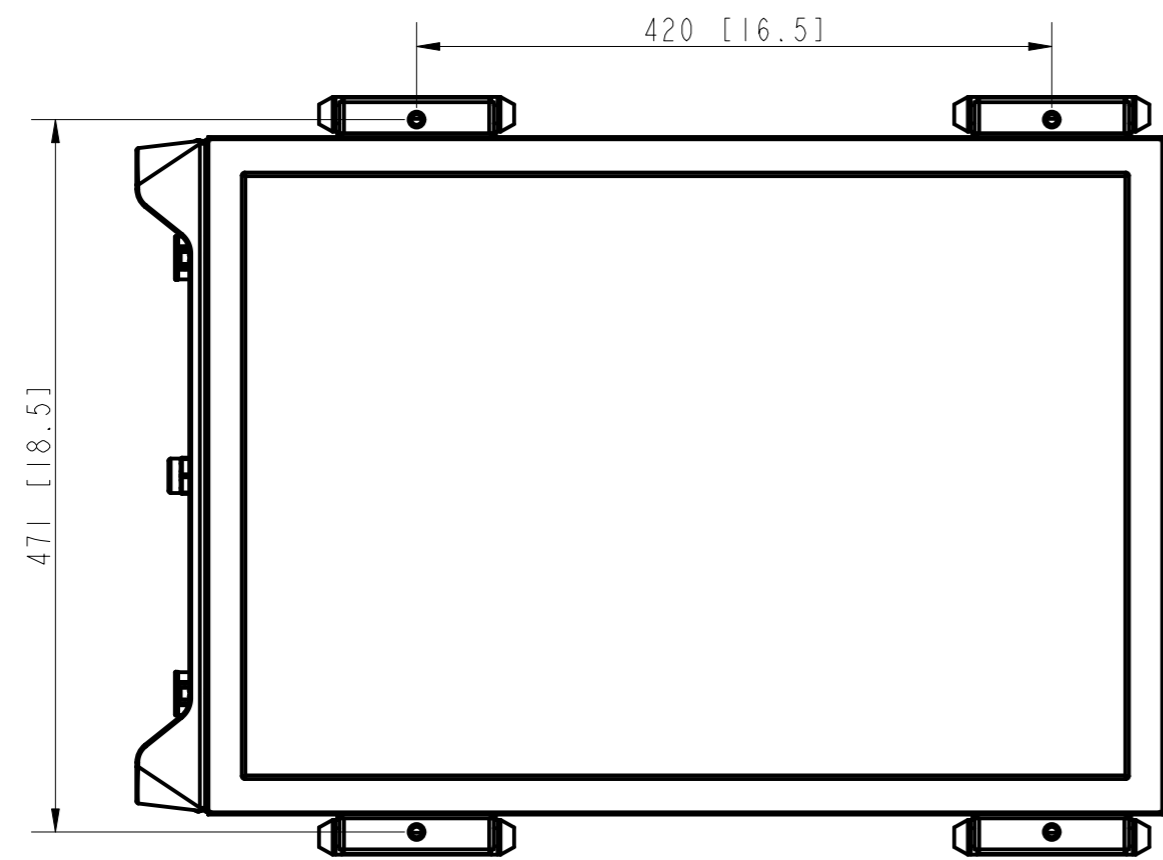
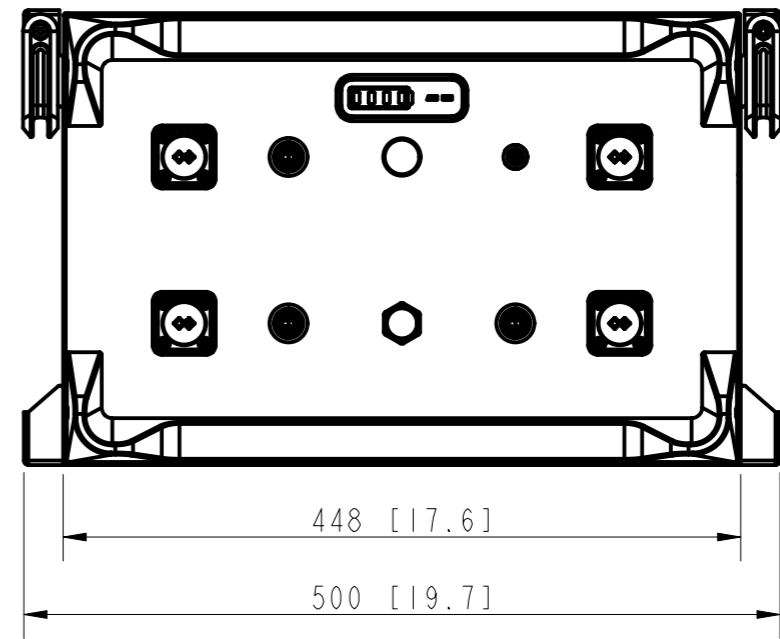
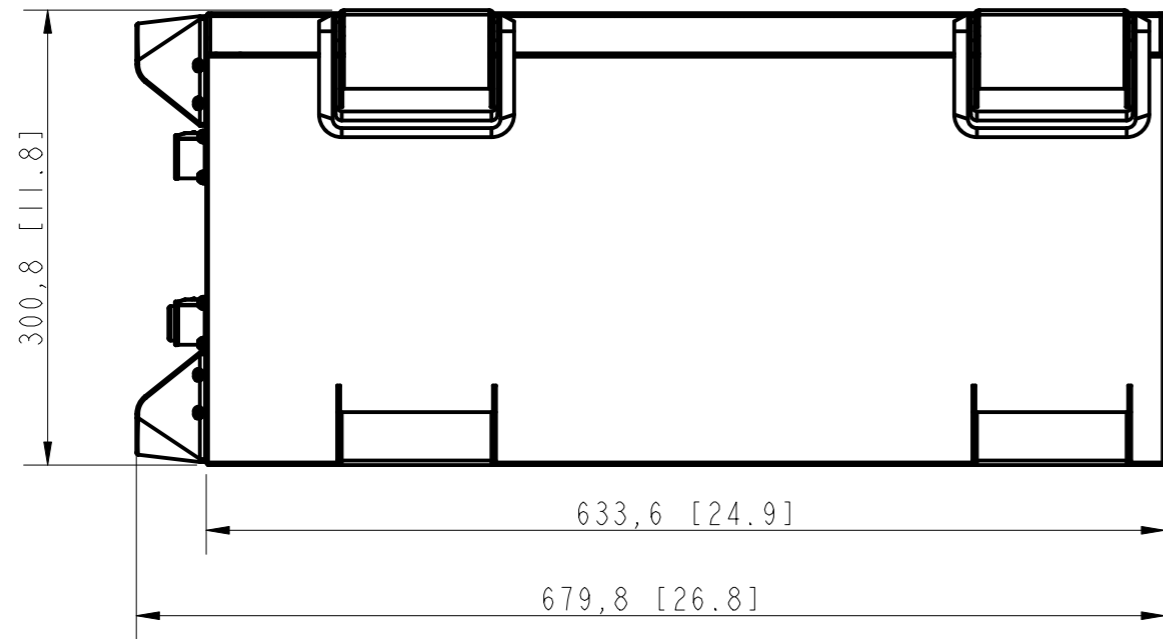
TRUCK SHOULD BE STATIONARY DURING DRONE TAKEOFF AND LANDING

1.3 Specifications

	G102-100
Chemistry	Lithium Iron Phosphate (LiFePO4)
Capacity	10.24 kWh / 100 Ah
Rated voltage	102.4 Vdc
Final Charging voltage	115.2 Vdc
Cut-off voltage	83.2 Vdc
Maximum charging current	100 A
Max continuous discharge current	100 A
Parallel connection	Up to 8 in 1 cluster. Multiple clusters are possible in the system
Serial Connection	Not supported
Storage temperature	-20-45°C Less than 1 month; -10-35°C Less than 6 months
Charging Temperature	0-55°C (32-131°F)
Discharging Temperature	-10-60°C (14-140°F)
Dimensions	68 x 50 x 30 cm ³ (19.7 x 26.7 x 11.8 in)
Weight	100 kg
Recommended battery level during storage	45%-50%
Recommended Mounting Position	Lay flat (handle facing up) or stand up (connector facing up)

1.4 Instructions before Use

- Before using the battery, please read the user manual carefully. Only adults who have fully read and understood this manual are allowed to operate this product.



510 W

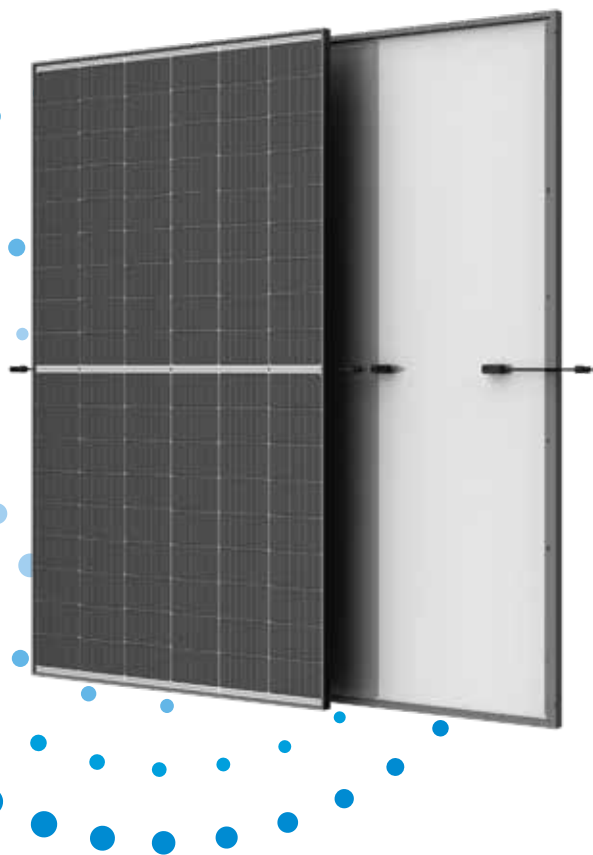
POTENCIA MÁXIMA DE SALIDA

0/+5 W

TOLERANCIA POSITIVA

22,9%

EFICIENCIA MÁXIMA



Tamaño óptimo para cubiertas comerciales e industriales

- Diseño de módulo compacto de tamaño medio para reducir el coste de la instalación y su tiempo de amortización
- Diseño de bajo voltaje para una mayor potencia por string



Diseño ligero de doble vidrio, alta fiabilidad

- Excelente resistencia al fuego y durabilidad en condiciones ambientales adversas y zonas de alta temperatura o alta humedad
- Hasta 5.400 Pa de carga de nieve y 2.400 Pa de carga de viento (cargas de ensayo)
- 25 años de garantía del producto



Maximiza la captación de energía

- Alta potencia del módulo: hasta 510 W y un 22,9 % de eficiencia gracias a la tecnología i-TOPCon de tipo n
- Degradación máxima del 1% el primer año y 0,4 % anual
- 30 años de garantía de potencia



Solución universal para cubiertas

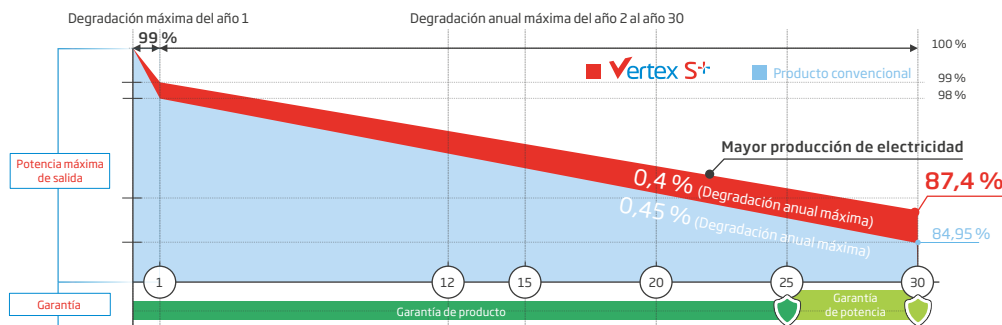
- Diseñado para ser compatible con los principales inversores, optimizadores y sistemas de montaje existentes
- Fácil de manejar (longitud inferior a 2 metros) e instalar en tejados gracias a su excelente tamaño y peso ligero
- Solución flexible para cualquier tipo de instalación

Garantía ampliada del Vertex S+

1 %
Degradación máxima del año 1

0,4 %
Degradación anual máxima del año 2 al 30

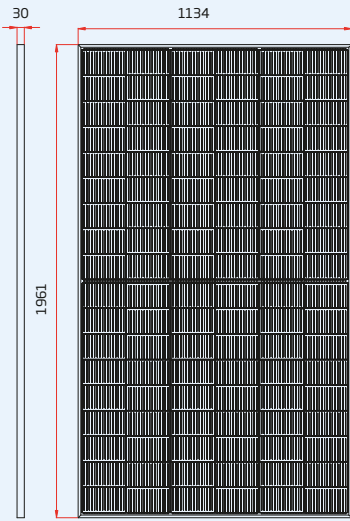
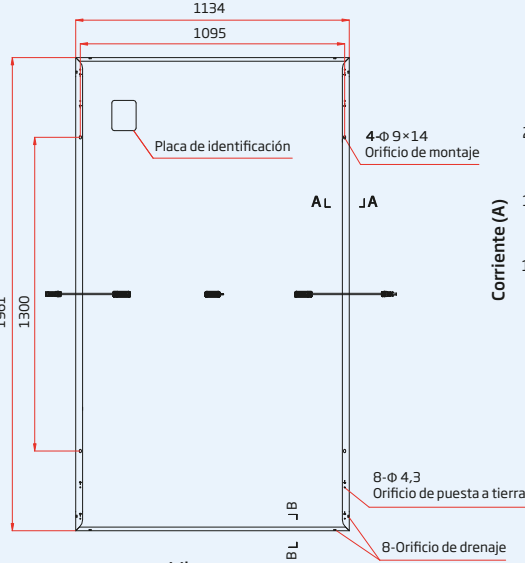
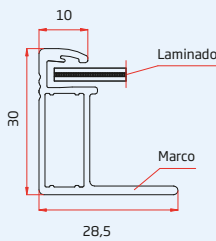
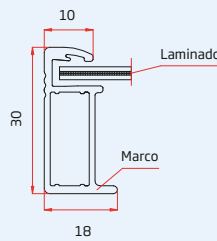
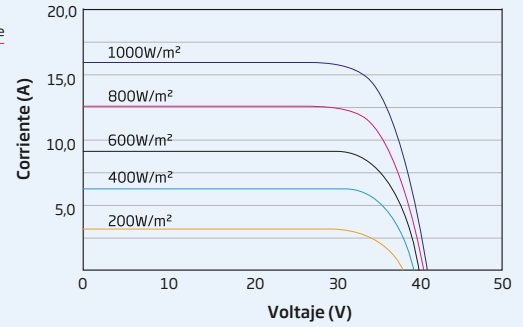
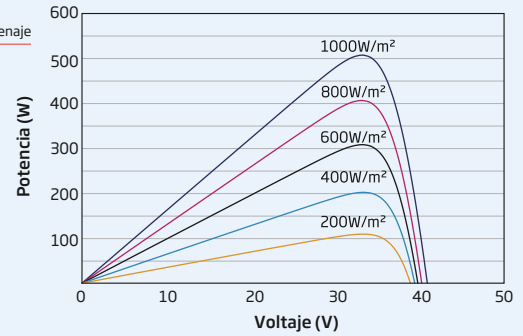
25 Años
Garantía de producto



Certificados de productos y sistemas



IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716
 ISO 9001: Sistema de Gestión de la Calidad
 ISO 14001: Sistema de Gestión Ambiental
 ISO14064: Verificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
 ISO45001: Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo

DIMENSIONES DEL MÓDULO (mm)

Vista frontal

Vista trasera

A-A

B-B
CURVAS I-V DEL MÓDULO (505 W)

CURVAS P-V DEL MÓDULO (505 W)


DATOS ELÉCTRICOS (STC)	TSM-485	TSM-490	TSM-495	TSM-500	TSM-505	TSM-510
	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28
Potencia Máxima-PMAX (Wp)*	485	490	495	500	505	510
Selección de potencia (W)**	0/+5					
Tensión en Máxima Potencia-VMPP (V)	32,7	32,9	33,1	33,3	33,5	33,7
Corriente en Máxima Potencia-IMPP (A)	14,84	14,91	14,97	15,03	15,09	15,14
Tensión de Circuito Abierto-VOC (V)	39,4	39,6	39,8	40,1	40,3	40,6
Corriente de Cortocircuito-ISC (A)	15,76	15,80	15,83	15,86	15,89	15,93
Eficiencia η m (%)	21,8	22,0	22,3	22,5	22,7	22,9

STC: Irradiancia de 1000 W/m², Temperatura de la célula de 25 °C, AM1,5.
*Tolerancia de medida de: ±3%. ** Selección de potencia hasta: +3%.

DATOS ELÉCTRICOS (NOCT)	TSM-485	TSM-490	TSM-495	TSM-500	TSM-505	TSM-510
	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28	NEG18R.28
Potencia Máxima-PMAX (Wp)	371	375	378	382	386	390
Tensión en Máxima Potencia-VMPP (V)	30,8	31,0	31,3	31,5	31,8	31,9
Corriente en Máxima Potencia-IMPP (A)	12,02	12,06	12,08	12,11	12,15	12,21
Tensión de Circuito Abierto-VOC (V)	37,4	37,6	37,7	38,0	38,3	38,5
Corriente de Cortocircuito-ISC (A)	12,70	12,74	12,76	12,78	12,81	12,84

NOCT: Irradiancia de 800 W/m², Temperatura ambiente de 20 °C, Velocidad del viento de 1 m/s.

DATOS MECÁNICOS

Células Solares	Monocristalinas
Número de células	108 células
Dimensiones del módulo	1961 × 1134 × 30 mm
Peso	23,5 kg
Vidrio frontal	1,6 mm, Alta transmisión, vidrio termoendurecido con recubrimiento AR
Vidrio trasero	1,6 mm, vidrio termoendurecido con recubrimiento AR
Marco	30 mm Aleación de aluminio anodizado, Negro
J-Box	IP 68, 3 diodos bypass
Cables	Cable fotovoltaico: 4,0 mm² Instalación en vertical: 1300/1300 mm Instalación en horizontal: 280/350 mm*
Conector	TS4 / TS4 Plus / MC4 EVO2*

*Bajo pedido

TASAS DE TEMPERATURA

NOCT (Temperatura de Operación Nominal de la Célula)	43°C (±2°C)
Coefficiente de Temperatura de P _{MAX}	-0,29%/°C
Coefficiente de Temperatura de V _{oc}	-0,24%/°C
Coefficiente de Temperatura de I _{sc}	0,04%/°C

LÍMITES OPERACIONALES

Temperatura de Operación	-40 a +85 °C
Tensión Máxima del Sistema	1500 V DC (IEC)
Capacidad Máxima del Fusible	30 A

GARANTÍA

25 años de garantía del Producto
30 años de garantía de Potencia
1 % de degradación el primer año
0,4 % de degradación anual de potencia

(Consulte la garantía de producto para más información)

CONFIGURACIÓN DE EMBALAJE

Módulos por caja:	36 unidades
Módulos por contenedor 40':	864 unidades

PRECAUCIÓN: LEA LAS INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD E INSTALACIÓN ANTES DE UTILIZAR EL PRODUCTO.

© 2024 Trina Solar Limitada. Todos los derechos reservados. Las especificaciones de esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso. El derecho de interpretación final pertenece a Trina Solar Co., Ltd.

Versión número: TSM_ESP_2024_C

Controladores de carga SmartSolar con interfaz VE.Can

MPPT 250/70 VE.Can hasta MPPT 250/100 VE.Can



Controlador de carga SmartSolar MPPT 250/100-Tr-VE.Can con pantalla conectable opcional



Controlador de carga SmartSolar MPPT 250/100-Tr-VE.Can sin pantalla



Sensor Bluetooth: Smart Battery Sense



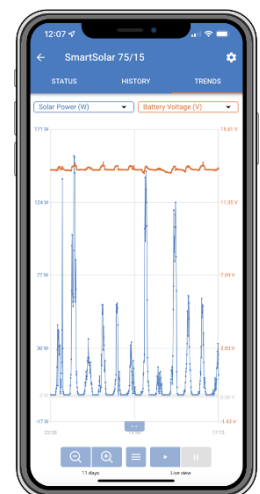
Sensor Bluetooth: Monitor de baterías BMV-712 Smart



Sensor Bluetooth: SmartShunt



Pantalla enchufable SmartSolar



Seguimiento ultrarrápido del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Especialmente con cielos nublados, cuando la intensidad de la luz cambia continuamente, un controlador MPPT ultrarrápido mejorará la recogida de energía hasta en un 30 %, en comparación con los controladores de carga PWM, y hasta en un 10 % en comparación con controladores MPPT más lentos.

Detección avanzada del Punto de Máxima Potencia en caso de nubosidad parcial

En caso de nubosidad parcial, pueden darse dos o más puntos de máxima potencia (MPP) en la curva de tensión de carga.

Los MPPT convencionales suelen seleccionar un MPP local, que no necesariamente es el MPP óptimo. El innovador algoritmo de SmartSolar maximizará siempre la recogida de energía seleccionando el MPP óptimo.

Excepcional eficiencia de conversión

Sin ventilador. La eficiencia máxima excede el 99 %.

Algoritmo de carga flexible

Un algoritmo de carga totalmente programable y ocho algoritmos de carga preprogramados, que se pueden elegir con un selector giratorio (consulte más información en el manual).

Amplia protección electrónica

Protección de sobretemperatura y reducción de potencia en caso de alta temperatura.

Protección de cortocircuito y polaridad inversa en los paneles FV.

Protección de corriente inversa FV.

Bluetooth Smart integrado

La solución inalámbrica para configurar, controlar, actualizar y sincronizar los controladores de carga SmartSolar.

Sensor de temperatura interno y sensor opcional externo de tensión, temperatura y corriente de la batería vía Bluetooth

Se puede usar un sensor Smart Battery Sense, un monitor de baterías BMV-712 Smart o un SmartShunt para comunicar la tensión y la temperatura de la batería (y la corriente, en caso de un BMV-712 o SmartShunt) a uno o más controladores de carga SmartSolar.

VE.Direct o VE.Can

Para una conexión de datos con cable a un panel Color Control GX, otros productos GX, un PC u otros dispositivos.

Carga en paralelo sincronizada con VE.Can o Bluetooth

Se pueden sincronizar hasta 25 unidades con VE.Can y hasta 10 unidades con Bluetooth.

Función de recuperación de baterías completamente descargadas

Empezará a cargar incluso si la batería está descargada hasta cero voltios.

Se reconectará a una batería de ion litio completamente descargada con función de desconexión interna.

VE.Can: la solución de controlador múltiple

Con VE.Can se pueden sincronizar hasta 25 unidades.

On/Off remoto

Para conectarse a un VE.BUS BMS, por ejemplo.

Relé programable

Puede programarse para programar una alarma, u otros eventos.

Opcional: Pantalla LCD conectable SmartSolar

Simplemente retire el protector de goma del enchufe de la parte frontal del controlador y conecte la pantalla.

Controlador de carga SmartSolar con interfaz VE.Can.	250/70	250/85	250/100
Tensión de la batería	Selección automática 12/24/48 V (36 V manual)		
Corriente de carga nominal	70 A	85 A	100 A
Potencia FV nominal, 12 V 1a,b)	1000 W	1200 W	1450 W
Potencia FV nominal, 24 V 1a,b)	2000 W	2400 W	2900 W
Potencia FV nominal, 36 V 1a,b)	3000 W	3600 W	4350 W
Potencia FV nominal, 48 V 1a,b)	4000 W	4900 W	5800 W
Máxima corriente de corto circuito FV 2)	35 A (máx. 30 A por conector MC4)		70 A (máx. 30 A por conector MC4)
Tensión máxima del circuito abierto FV	250 V máximo absoluto en las condiciones más frías 245 V en arranque y funcionando al máximo		
Eficacia máxima	99 %		
Autoconsumo	Menos de 35 mA a 12 V / 20 mA a 48 V		
Tensión de carga de "absorción"	Valores predeterminados: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6 V (regulable con: selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth)		
Tensión de carga de "flotación"	Valores predeterminados: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2 V (regulable con: selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth)		
Tensión de carga de "equalización»	Valores predeterminados: 16,2 V / 32,4 V / 48,6 V / 64,8 V (regulable)		
Algoritmo de carga	adaptativa multietapas (ocho algoritmos preprogramados) o algoritmo definido por el usuario		
Compensación de temperatura	-16 mV / -32 mV / -64 mV / °C		
Protección	Polaridad inversa FV/Cortocircuito de salida/Sobretensión		
Temperatura de trabajo	De -30 a +60 °C (potencia nominal completa hasta los 40 °C)		
Humedad	95 %, sin condensación		
Altitud máxima	5.000 m (potencia nominal completa hasta los 2.000 m)		
Condiciones ambientales	Para interiores, no acondicionados		
Grado de contaminación	PD3		
Comunicación de datos	VE.Can, VE.Direct y Bluetooth		
Interruptor on/off remoto	Sí (conector bifásico)		
Relé programable	DPST Capacidad nominal CA: 240 VCA / 4 A Capacidad nominal CC: 4 A hasta 35 VCC, 1 A hasta 60 VCC		
Funcionamiento en paralelo	Sí, funcionamiento sincronizado en paralelo con VE.Can (máx. 25 unidades) o Bluetooth (máx. 10 unidades)		
CARCASA			
Color	Azul (RAL 5012)		
Terminales FV 3)	35 mm ² / AWG2 (modelos Tr), Dos pares de conectores MC4 (modelos MC4)	35 mm ² / AWG2 (modelos Tr), Tres pares de conectores MC4 (modelos MC4)	
Bornes de la batería	35mm ² / AWG2		
Grado de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)		
Peso	3 kg	4,5kg	
Dimensiones (al x an x p) en mm	Modelos Tr: 185 x 250 x 95 mm Modelos MC4: 215 x 250 x 95 mm	Modelos Tr: 216 x 295 x 103 Modelos MC4: 246 x 295 x 103	
NORMAS			
Seguridad	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2		
TENDENCIAS GUARDADAS			
Datos guardados	Tensión, corriente y temperatura de la batería, además de corriente de salida de carga, tensión FV y corriente FV.		
Número de días durante los que se guardan los datos de tendencias	46		
<p>1a) Si se conecta más potencia FV, el controlador limitará la entrada de potencia.</p> <p>1b) La tensión FV debe exceder Vbat + 5 V para que arranque el controlador. Una vez arrancado, la tensión FV mínima será de Vbat + 1 V.</p> <p>2) Un sistema FV con una corriente de cortocircuito más alta podría dañar el controlador.</p> <p>3) Modelos MC4: se podrían necesitar varios pares de separadores para conectar en paralelo las cadenas de paneles solares Corriente máximo por conector MC4: 30 A (los conectores MC4 están conectados en paralelo a un rastreador MPPT)</p>			



Con VE.Can, pueden conectarse en cadena hasta 25 controladores de carga y conectarse a su vez a un Color Control GX o a otro dispositivo GX
Cada Controlador puede supervisarse por separado, por ejemplo, en un Color Control GX y en el sitio web VRM

ANEXO VIII: PRODUCCIÓN DE LAS PLACAS SOLARES

Para el desarrollo del proyecto, se ha realizado un estudio de la irradiación solar en diversas zonas donde España tiene operaciones o áreas de interés estratégico, mostrado en la Tabla VIII- 1. Debido a la variación estacional en la producción de energía solar, el análisis se ha dividido en operaciones de verano e invierno, ya que la generación fotovoltaica varía significativamente entre ambas épocas del año.

Para este estudio, se ha utilizado el sistema de información fotovoltaica geográfica de la Unión Europea, el JRC *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. A partir del número de paneles y del tipo seleccionado, se ha determinado que la instalación tendrá una potencia nominal de 8,16 kW.

En invierno, la producción mínima se registra en Palma de Mallorca, donde se generan 18,35 kWh diarios, lo que equivale a un incremento de autonomía de poco más de un día para la plataforma. En verano, la menor producción se obtiene en Bata, Guinea Ecuatorial, con un valor de 28,53 kWh diarios, lo que permite aumentar la autonomía aproximadamente dos días.

Por otro lado, en La Valeta (Malta), la producción es notablemente superior. En invierno, se generan 22,29 kWh diarios, mientras que en verano la producción aumenta hasta 44,14 kWh diarios, lo que permite que, en esta última estación, la plataforma pueda operar con casi autonomía total, ya que la energía generada se acerca al consumo diario estimado.

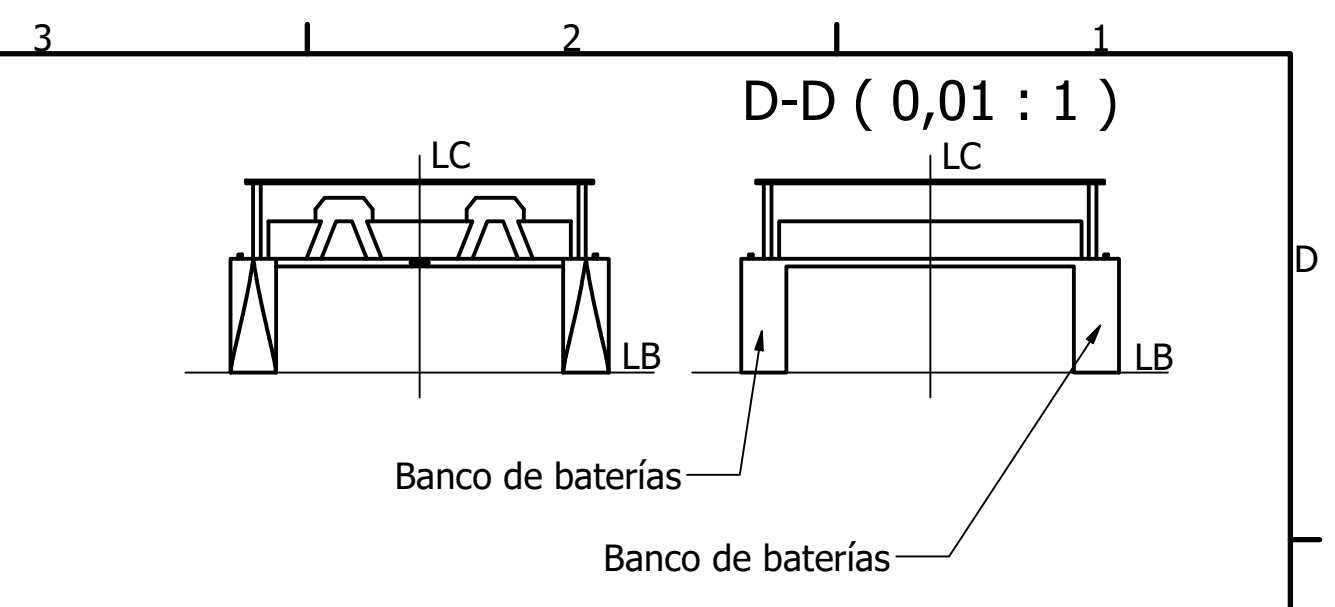
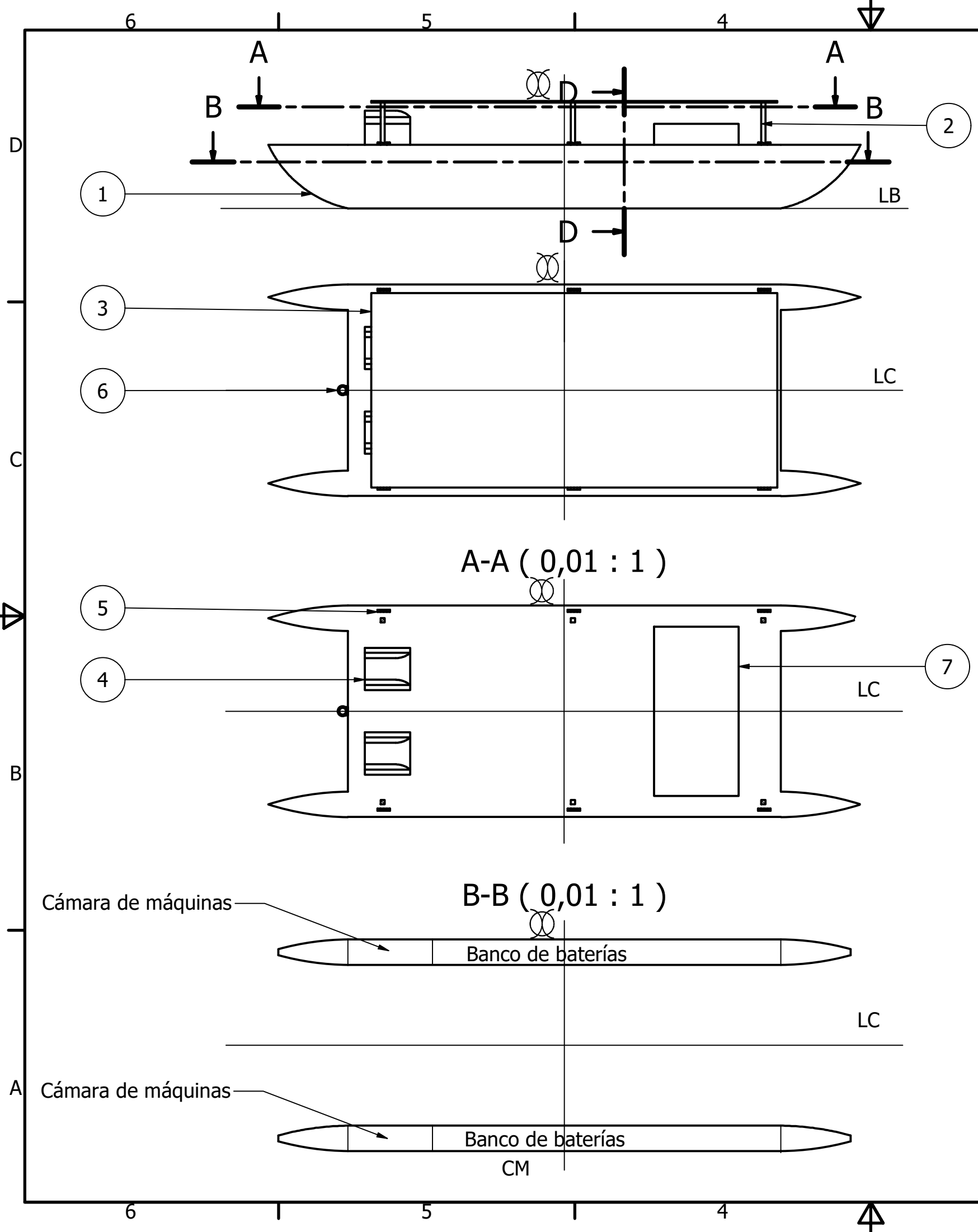
Además, se ha tenido en cuenta la variabilidad de las estaciones en el hemisferio sur, observando, por ejemplo, que en Bata la producción es menor en verano que en invierno, debido a la diferente distribución de la radiación solar en esa región.

Por último, cabe destacar que, en ubicaciones como La Valeta, durante el verano, la producción fotovoltaica es tan elevada que se acerca al consumo diario de la plataforma, lo que permitiría alcanzar una autonomía prácticamente indefinida, dependiendo de las condiciones climáticas y la eficiencia del sistema.

Estación		Anual			Invierno		Verano	
Zona		Producción media diaria kWh/kW	Producción medio mensual kWh/kW	Producción diaria para PV propuesto (kWh)	Producción media (kWh/kW)	Producción media diaria para PV propuesto (kWh)	Producción media (kWh/kW)	Producción media diaria para PV propuesto (kWh)
Atlántico	Las Palmas de Gran Canarias	3,89	118,43	31,77	3,12	25,42	4,67	38,08
	Alborán	4,05	123,26	33,07	2,77	22,64	5,32	43,41
Mediterráneo	Norte de Mallorca	3,55	107,85	28,93	2,25	18,35	4,83	39,42
	La Valeta	4,08	123,99	33,27	2,73	22,29	5,41	44,14
	Chipre	4,20	127,78	34,27	2,88	23,47	5,52	45,01
Mar Rojo	Arabia Saudí	4,78	145,26	38,96	3,89	31,72	5,66	46,18
	Iritrea, Isla Harmil	4,59	139,58	37,44	4,23	34,51	4,95	40,37
Cuerno de Somalia	Somalia, Muqdisho	4,98	151,50	40,65	5,16	42,11	4,81	39,23
	Somalia, Berbera	4,96	150,77	40,45	4,86	39,66	5,06	41,26
	Seychelles, Victoria	4,19	127,35	34,16	4,28	34,89	4,10	33,47
Golfo de Guinea	Bata, guinea ecuatorial	3,60	112,91	29,38	3,94	32,11	3,50	28,53
	Santo Tome y Principe	4,03	122,48	32,88	3,31	27,01	4,03	32,86

Tabla VIII- 1 Estudio irradiación solar.

ANEXO IX: DISPOSICIÓN GENERAL Y DETALLES

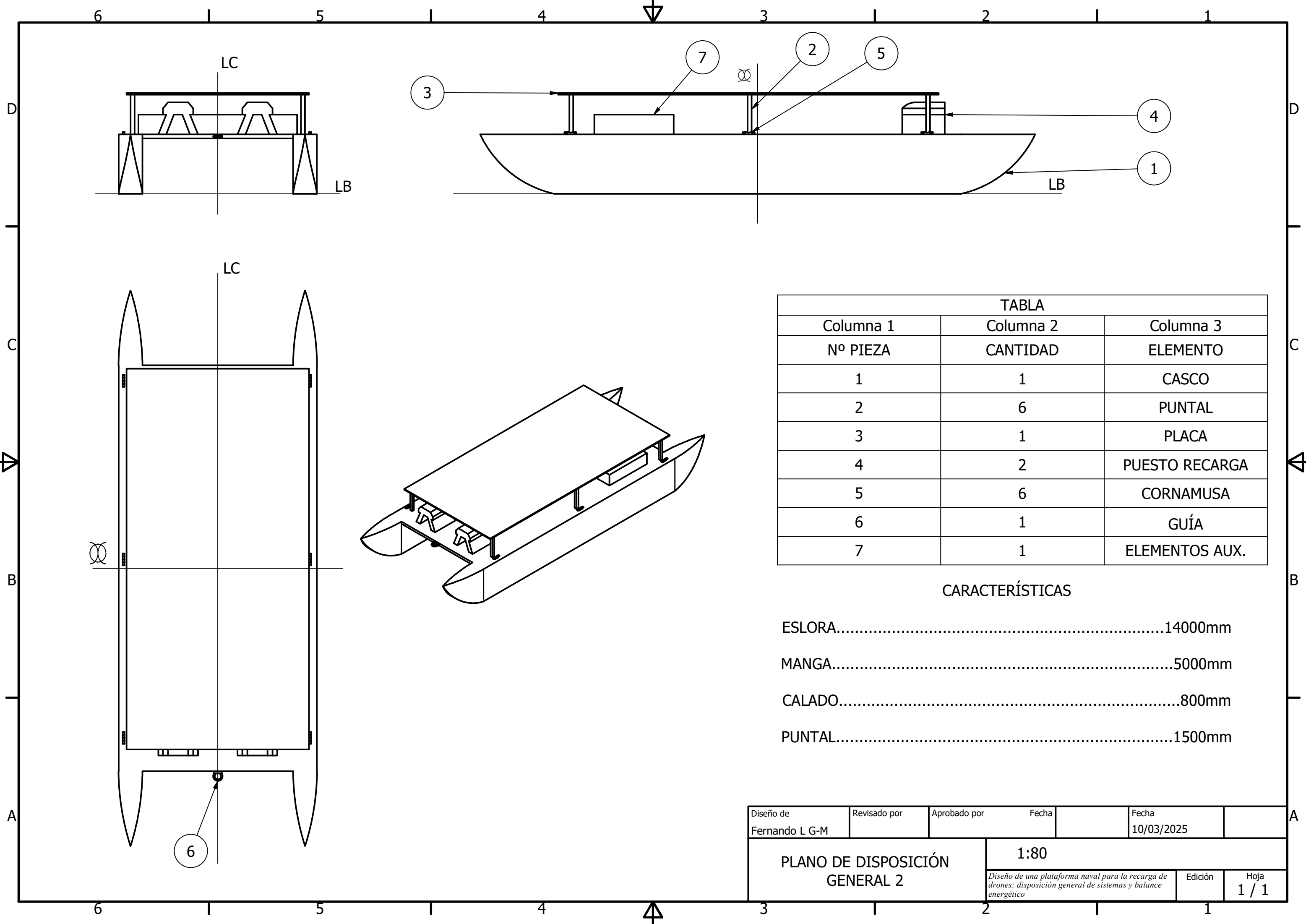


NOTAS		
Nº PIEZA	CANTIDAD	ELEMENTO
1	1	CASCO
2	6	PUNTAL
3	1	PLACA
4	2	PUESTO RECARGA
5	6	CORNAMUSA
6	1	GUÍA
7	1	ELEMENTOS AUX.

CARACTERÍSTICAS

ESLORA.....14000mm
 MANGA.....5000mm
 CALADO.....800mm
 PUNTAL.....1500mm

Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 10/03/2025
PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL			1:100	
			Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético	Edición



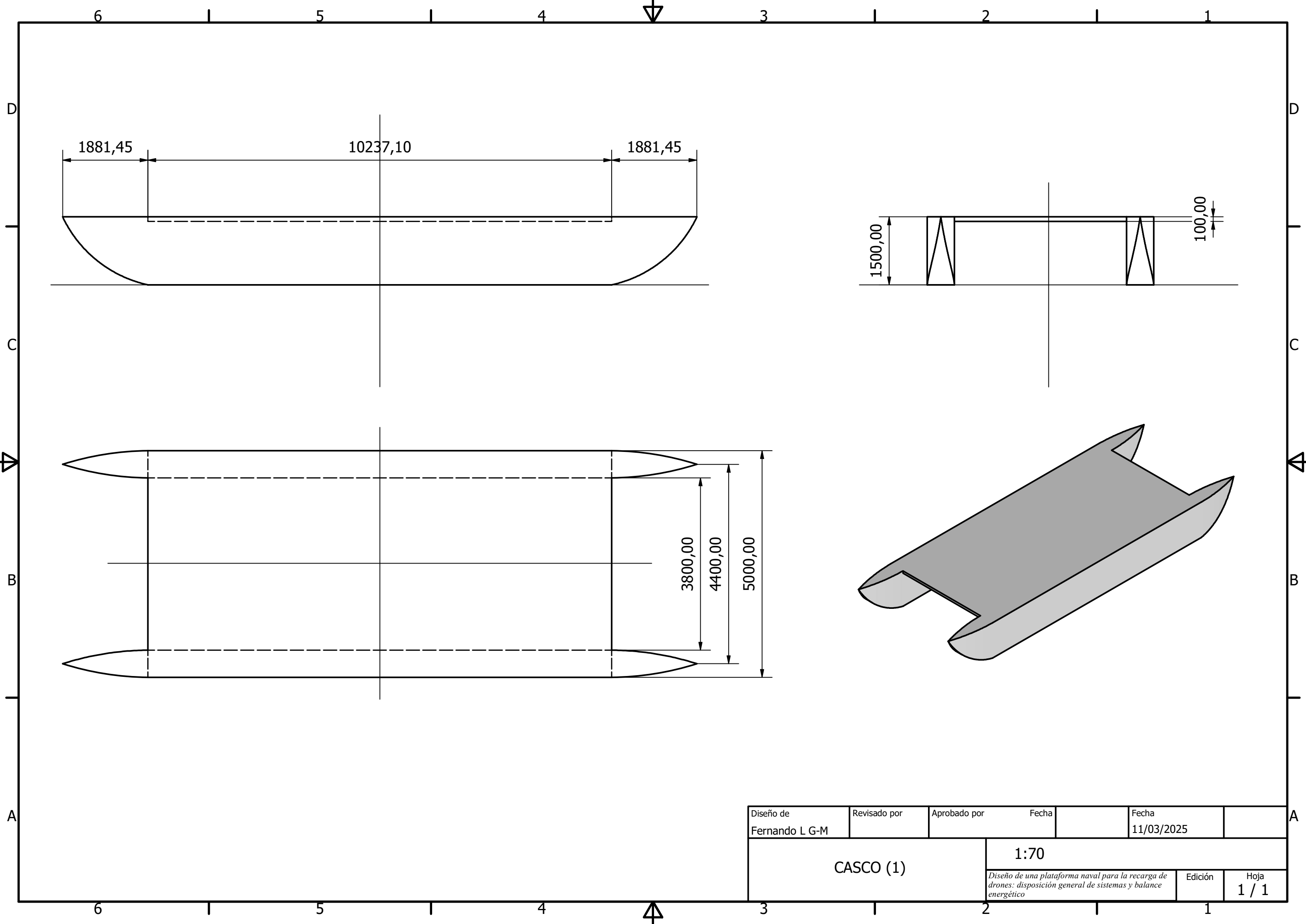
TABLA

Columna 1	Columna 2	Columna 3
Nº PIEZA	CANTIDAD	ELEMENTO
1	1	CASCO
2	6	PUNTAL
3	1	PLACA
4	2	PUESTO RECARGA
5	6	CORNAMUSA
6	1	GUÍA
7	1	ELEMENTOS AUX.

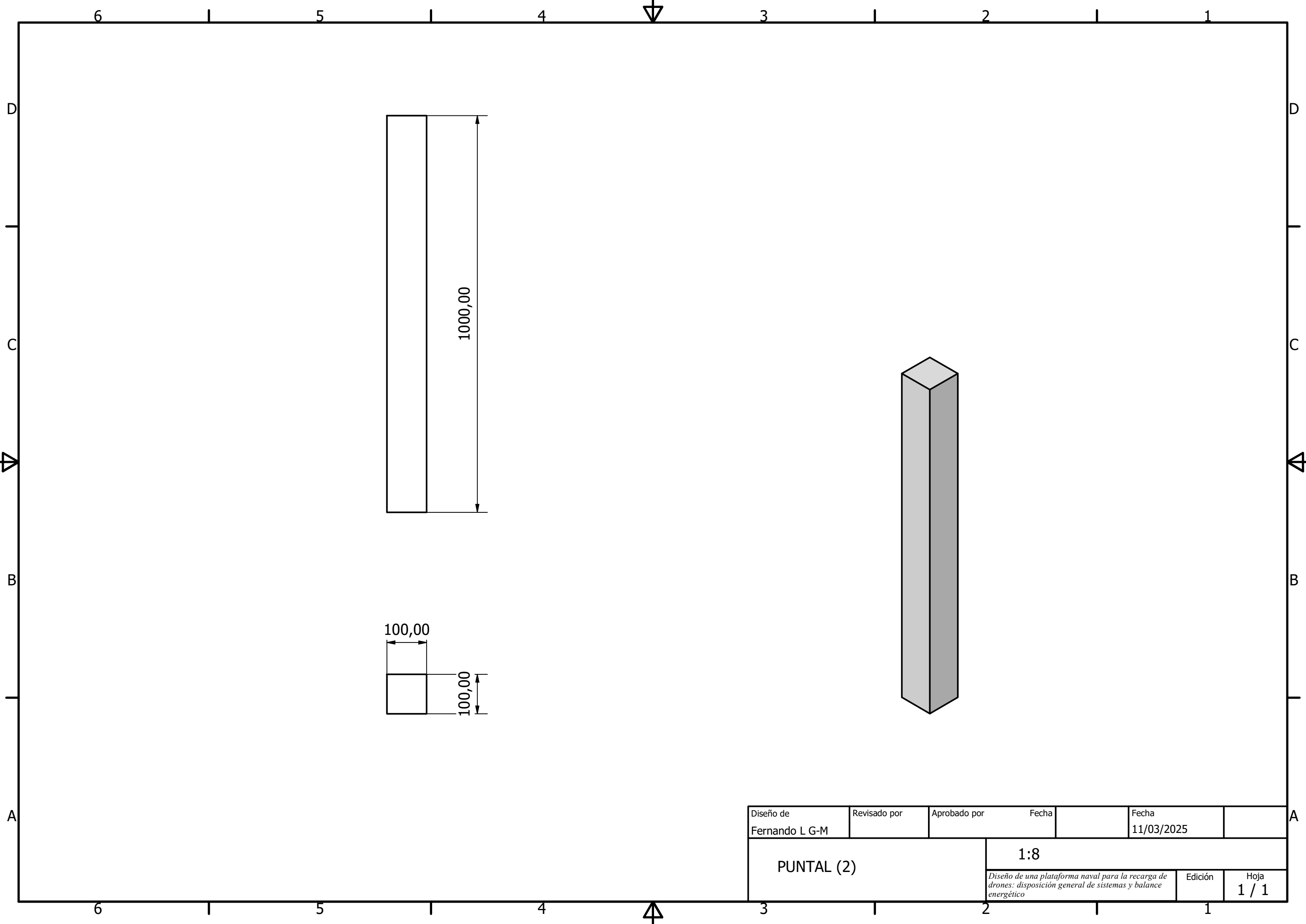
CARACTERÍSTICAS

ESLORA.....14000mm
MANGA.....5000mm
CALADO.....800mm
PUNTAL.....1500mm

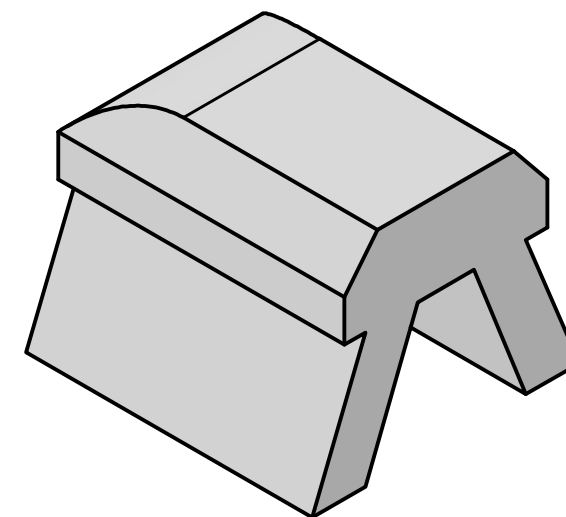
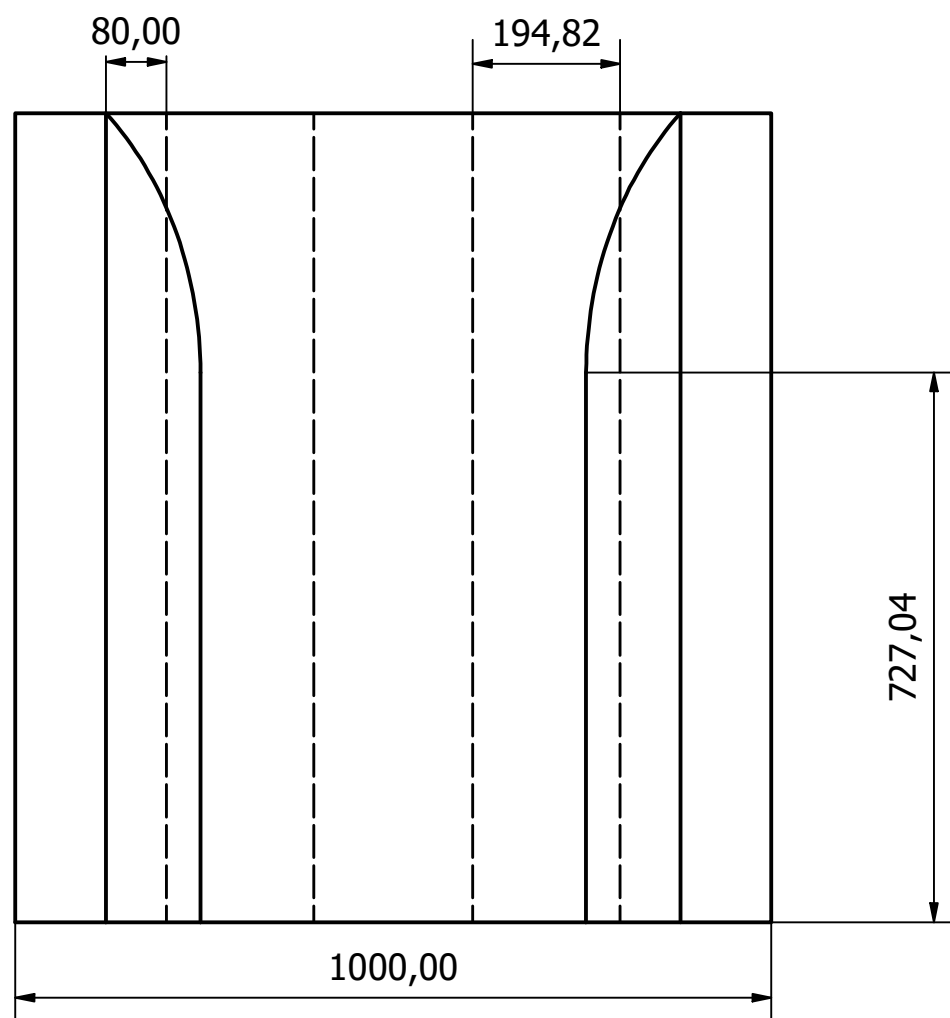
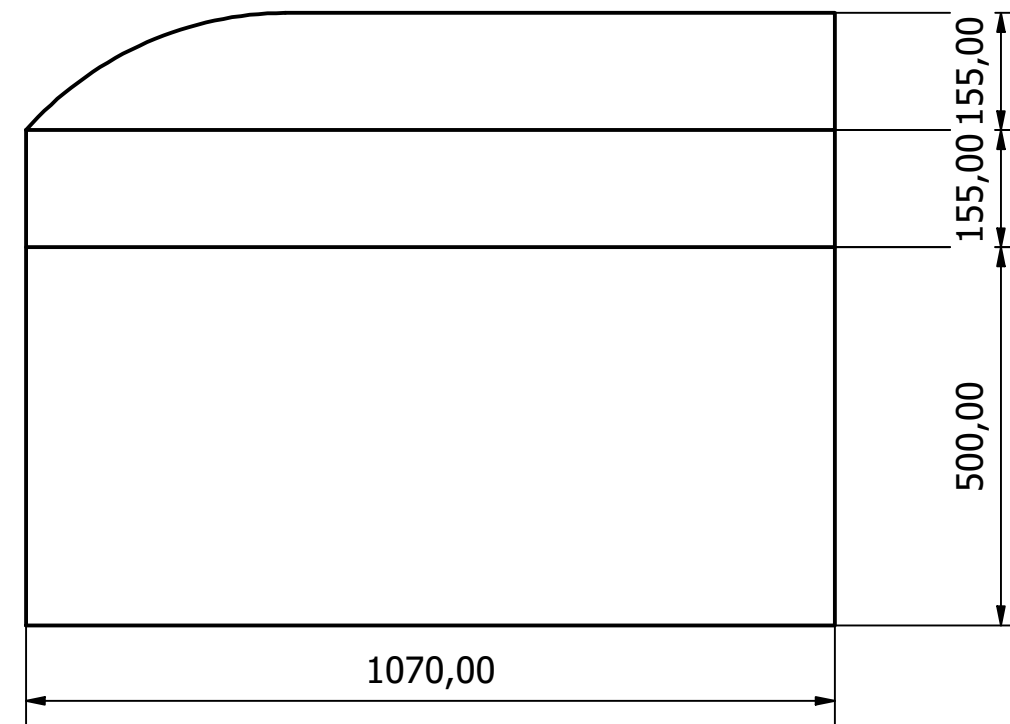
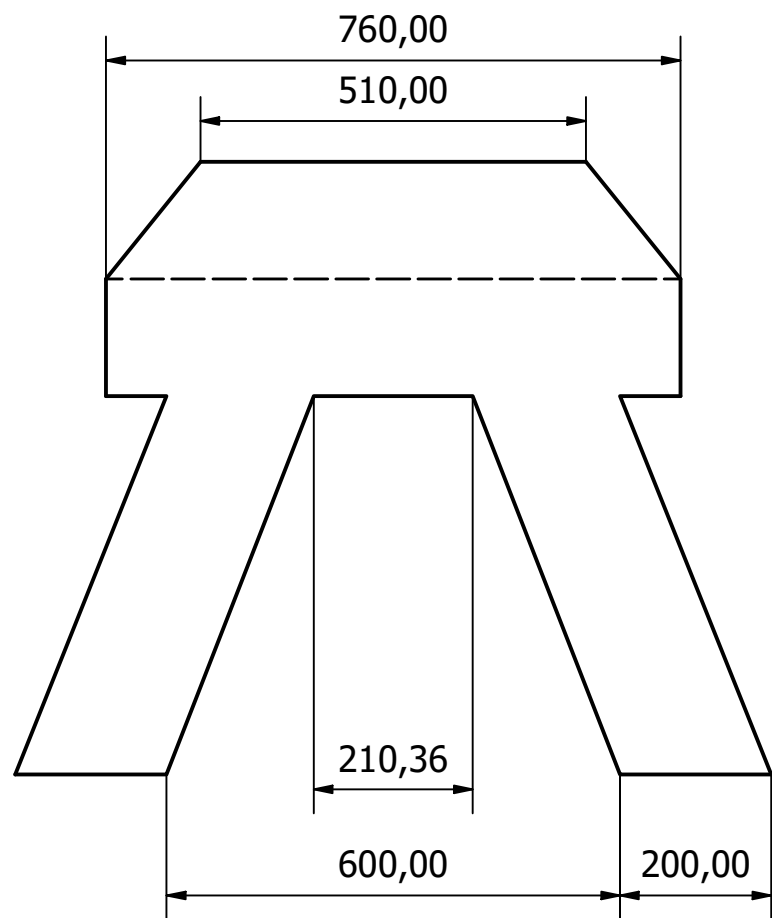
Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 10/03/2025
PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL 2			1:80	
			<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición



Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
CASCO (1)			1:70	
			<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición 1

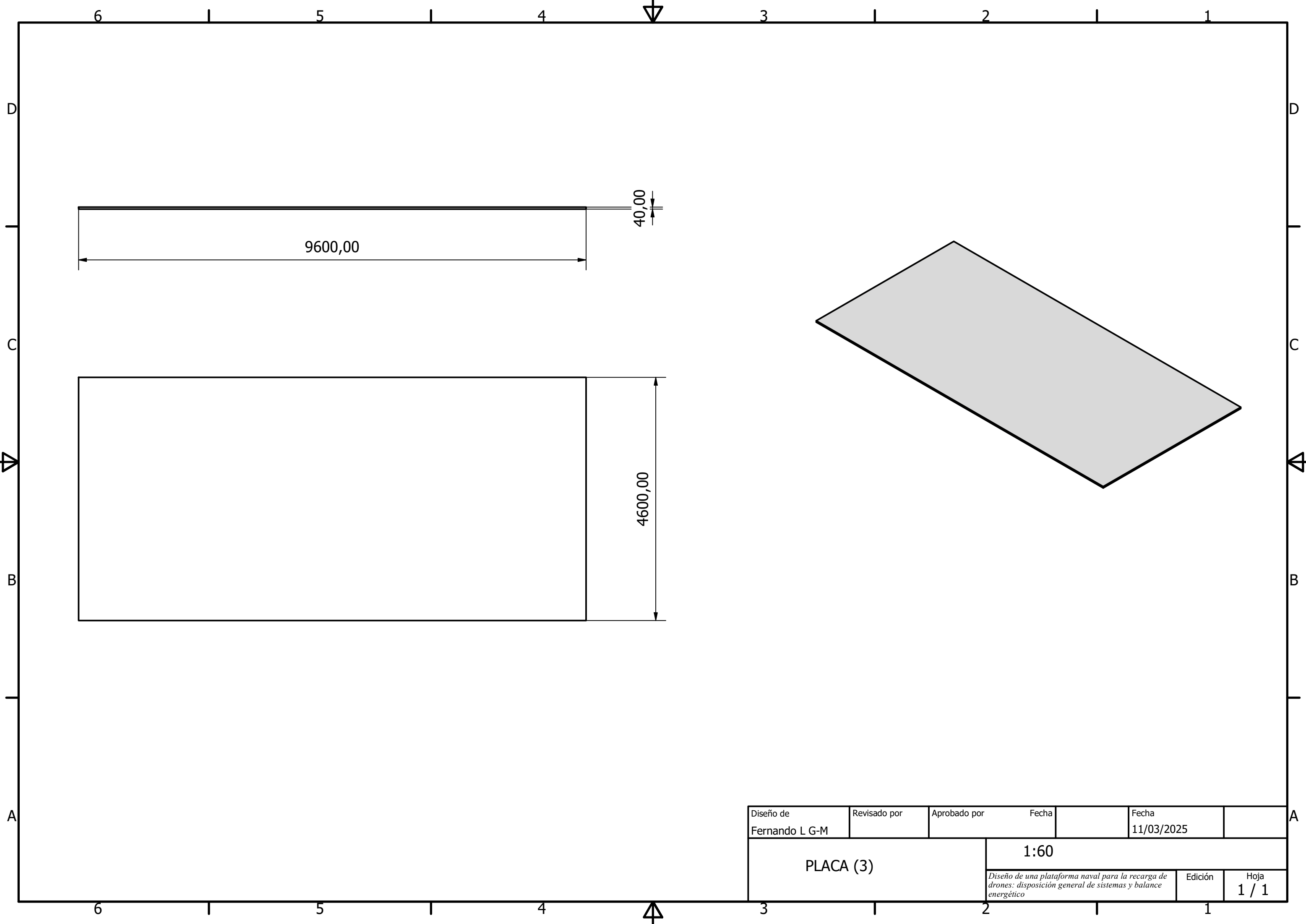


Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
PUNTAL (2)			1:8	
			<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición 1

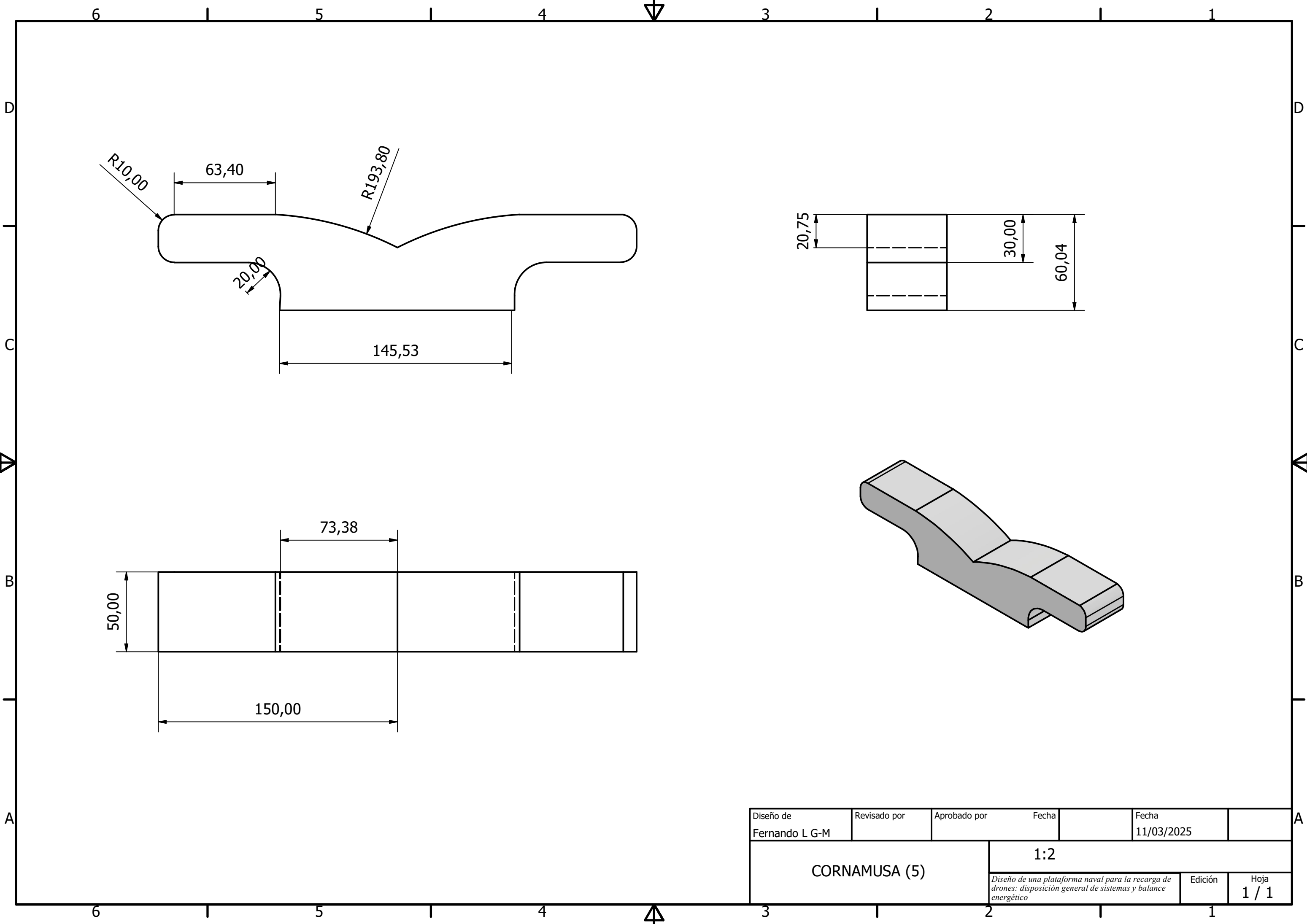


Nota aclaratoria:
Dimensiones aproximadas a la estación de recarga.

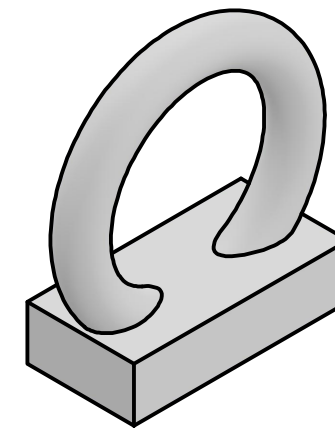
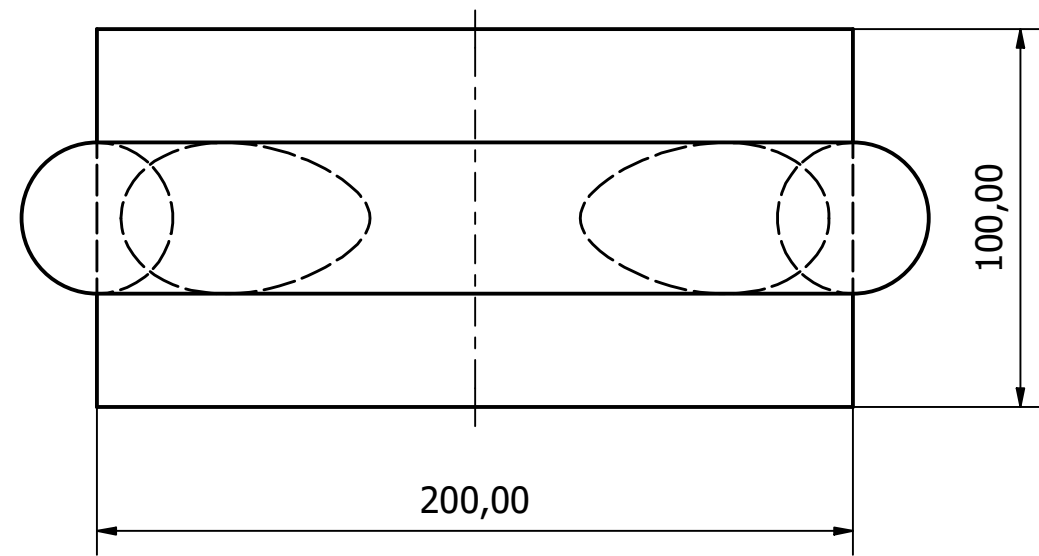
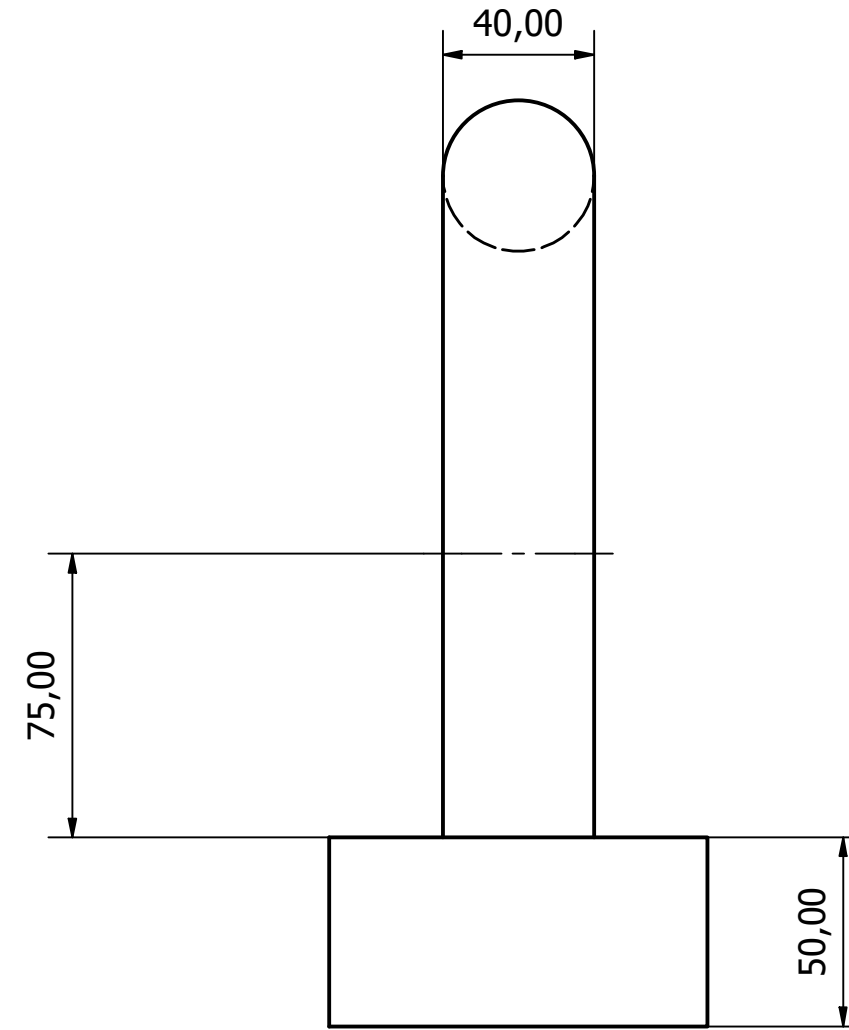
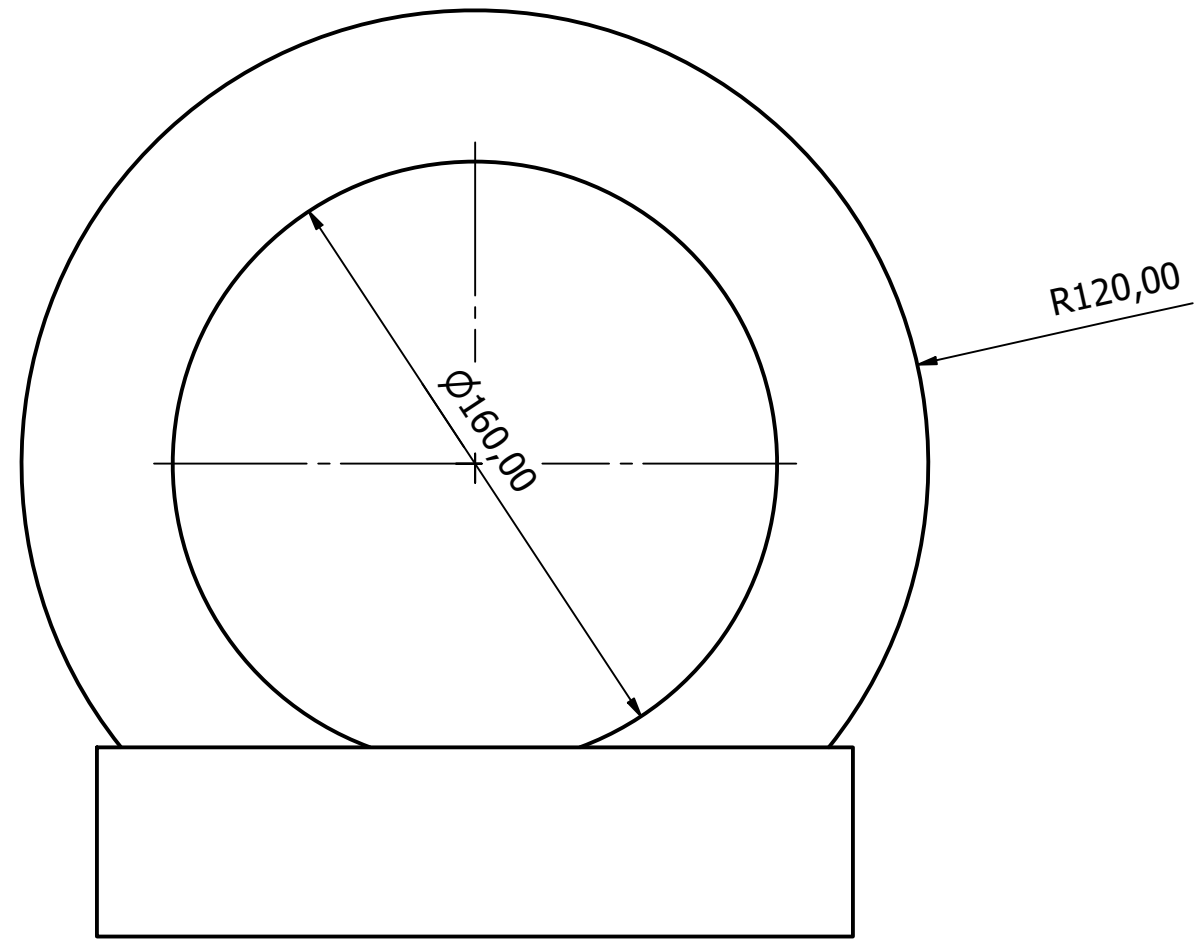
Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
PUESTO DE RECARGA (4)			1:10	
<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>			Edición	Hoja 1 / 2



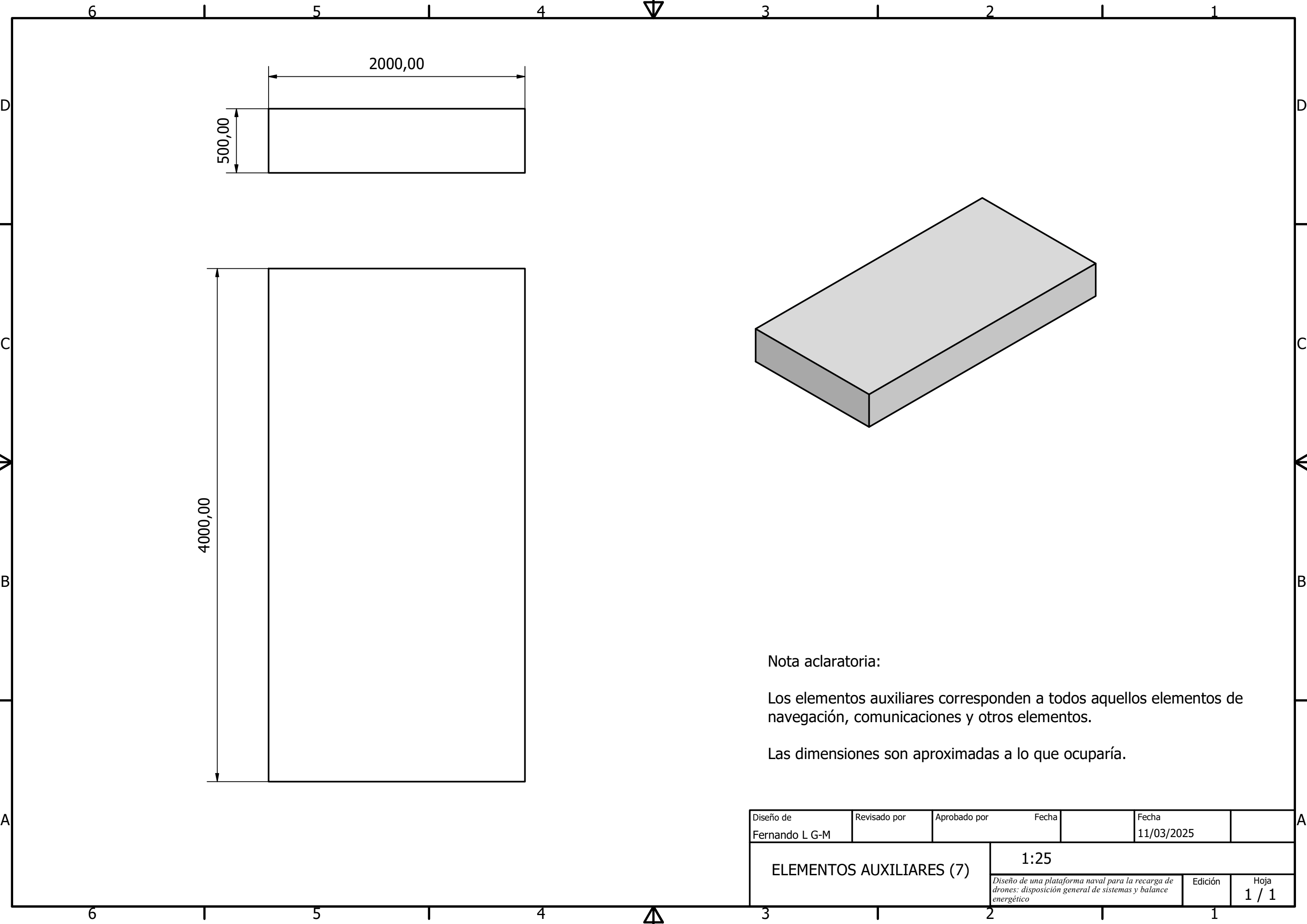
Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
PLACA (3)			1:60	
			<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición 1



Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
CORNAMUSA (5)			1:2	
			Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético	Edición 1



Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
GUÍA (6)			1:2	
			<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición 1



Nota aclaratoria:

Los elementos auxiliares corresponden a todos aquellos elementos de navegación, comunicaciones y otros elementos.

Las dimensiones son aproximadas a lo que ocuparía.

Diseño de Fernando L G-M	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/03/2025
ELEMENTOS AUXILIARES (7)		1:25		
		<i>Diseño de una plataforma naval para la recarga de drones: disposición general de sistemas y balance energético</i>	Edición 1	Hoja 1 / 1

ANEXO X: PRESUPUESTO

Grupo	Elemento	Precio unitario (€)	Cantidad	Costo total (€)
Sistemas principales	Motores	2.744,00	2	5.488,00
	Estación de recarga	29.000,00	2	58.000,00
	Baterías	6.000,00	14	84.000,00
Estructura de la plataforma	Componentes monolíticos	100.000,00	1	100.000,00
	Componentes sándwich	24.000,00	1	24.000,00
Sistemas de energía y almacenamiento	Placas solares	95,00	16	1.520,00
	MPPT	576,00	2	1.152,00
	Convertidores	1.500,00	1	1.500,00
	Protecciones	1.000,00	2	2.000,00
	GlobalLink 520	300,00	1	300,00
	Cerbo GX	400,00	1	400,00
	Cableado y conectores	3.000,00	1	3.000,00
Sistemas de navegación y comunicaciones	Sensores de navegación y GPS	5.000,00	1	5.000,00
	Sistema de comunicación	4.000,00	1	4.000,00
	Cámara	9.000,00	1	9.000,00
Mano de obra y ensamblaje	Herramientas y ensamblaje	5.000,00	1	5.000,00
	Ingeniería	50.000,00	1	50.000,00
Pruebas y certificaciones		10.000,00	1	10.000,00
Total de fabricación				364.360,00
Contingencias (10 %)				36.436,00
Beneficio industrial (30 %)				109.308,00
Total de obtención				510.104,00

Tabla X- 1 Presupuesto total.