



UNICO I+D Project
6G-SORUS-DRONE

SORUS-DRONE-A2.1-E3

Perfilado de UAV Versión Final

Abstract

The SORUS-DRONES project focuses on the challenges posed by the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs, UAS, drones) with virtualized radio access networks (vRAN) and reconfigurable intelligent surfaces (RIS) in the deployment and operation of a B5G network.

The process of analyzing different solutions and defining prototypes for validation testing is carried out in the PROFILING phase. This document presents the final iteration of the conceptual and functional development of this PROFILING phase, with results of final stages for the tests aimed at creating the tools required to achieve the goals of the project.

Propiedades del documento

Número de documento	SORUS-DRONE-A2.1-E3
Título	Perfilado de UAV
Editor	Miguel Rosa (AEROTOOLS)
Responsable del documento	Miguel Rosa (AEROTOOLS)
Equipo de redacción	Jeremy Comellas, Alberto Cristóbal Granda, Pablo Gutierrez Benavides, Jonathan Martínez Díez (AEROTOOLS)
Target dissemination level	
Status of the document	
Version	3.0
Delivery date	30/12/2024
Actual delivery date	30/12/2024

Revisión

--	--

Descargo de Responsabilidad

Este documento ha sido generado en el contexto del 6G-SORUS-XXX. La investigación que ha llevado a estos resultados ha recibido financiación del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital de España y de la Unión Europea-NextGenerationEU a través del programa UNICO 5G I+D.

Toda la información en este documento se proporciona "tal cual" y no se ofrece ninguna garantía de que la información sea adecuada para algún propósito en particular. El usuario utiliza la información bajo su propio riesgo y responsabilidad.

Contenido

Lista de Gráficos	4
Lista de Abreviaturas y Acrónimos	5
Resumen Ejecutivo	7
1. Introducción.....	8
2. Casos de Uso y Parametrización	9
3. Desarrollo del MPP para el PERFILADO FINAL	15
4. Resultados de la tercera iteración del MPP	23
4.1. Apartado PLATAFORMA.....	29
4.2. Apartado PROPULSIÓN	33
4.2.1. Pruebas y Ensayos	33
4.2.2. Ajuste por interpolación.....	39
4.2.3. Ajuste por modelos no lineales (Corrección Polinómica).....	41
4.2.4. Ajuste por optimización (Error Cuadrático Medio).....	43
4.2.5. Ajuste proporcional simple (Método Iterativo).....	44
4.3. Apartado ALIMENTACIÓN.....	46
4.3.1. Tecnología del hidrógeno.	46
4.3.2. Tecnologías de baterías.....	48
4.4. Apartado ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES.....	50
4.5. Apartado CARGA DE PAGO	55
5. Análisis de coste y operativo	58
6. Conclusiones.....	61
Referencias	64

Lista de Gráficos

Figura 2.1 Tabla resumen Casos de Uso	11
Figura 3.1 Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP.....	16
Figura 3.2 Bloque 1- Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP.....	18
Figura 3.3 Bloque 2- Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP.....	19
Figura 3.4 Bloque 3 - Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP.....	20
Figura 3.5 Pestaña DISEÑO NUEVO DRON - Interfaz MPP.....	21
Figura 3.6 Pestaña PROPULSIÓN - Interfaz MPP.....	22
Figura 4.1 Diagrama funcional de la Plataforma de Vuelo	24
Figura 4.2 Diagrama funcional de la Propulsión.....	25
Figura 4.3 Diagrama funcional de la Alimentación.....	26
Figura 4.4 Diagrama funcional de Electrónica y Comunicaciones.....	27
Figura 4.5 Diagrama funcional de Cargas de Pago.....	28
Figura 4.1.1 Tabla Comparativa de posibles Plataformas de Vuelo para la solución UAV	30
Figura 4.1.2 Ejemplo de Plataforma de vuelo analizada: Alta X.....	32
Figura 4.2.1 Ensayos Motor MN4010 con Hélice P13*4,4 y P14*4.8 Datos fabricante (1) Datos propios (0)	34
Figura 4.2.2 Detalle diferencias de ensayos Motor MN4010 con Hélice P13*4,4 y P14*4.8	36
Figura 4.2.3 Comparación MN701S – P24*7.2 Datos fabricante (1) Datos propios (0).....	37
Figura 4.2.4 Comparación MN705S – G26*8.5 Datos Fabricante (1) Datos Ensayos propios (0)	38
Figura 4.2.5 Ejemplo interpolación polinómica.....	41
Figura 4.2.6 Ejemplo interpolación Spline.....	41
Figura 4.2.7 Ajuste por Modelo de Regresión Polinómica.....	43
Figura 4.2.8 Ajuste por Error Cuadrático.....	44
Figura 4.2.9 Ajuste por extrapolación cuantitativa.....	45
Figura 4.2.1 H2D55 Heven Drones [2].....	47
Figura 4.2.2 Dron h2 dron energy	48
Figura 4.2.3 Baterías Li-Ion.....	49
Figura 4.3.1 Esquema de comunicaciones 4G (Pixhawk, Raspberry Pi y modem 4G LTE USB).....	50
Figura 4.3.2 Montaje de comunicaciones 4G (Pixhawk, Raspberry Pi y modem 4G LTE USB).....	50
Figura 4.3.3 Esquema global de dispositivos electrónicos y elementos virtuales interconectados.	52
Figura 4.3.4 Montajes realizados para la gestión de IPs y transferencia de datos.....	53
Figura 4.4.1 Análisis de radio frecuencia radial	56
Figura 4.4.2 Análisis de radio frecuencia concéntrico a la antena.....	56
Figura 4.4.3 Dron portando medidor de RF una antena directiva multifrecuencia de ángulo cerrado con posibilidad de orientación vertical u horizontal.....	57

Lista de Abreviaturas y Acrónimos

4G-LTE	Fourth Generation - Long-term evolution
4S	4 Cells (Batteries)
5G	Fifth-generation
6G	Sixth Generation of Wireless Communication Technology
6S	6 Cells (Batteries)
B5G	Beyond 5G
BEC	Regulador electrónico de voltaje
BS	Base Station
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
GIS	Geographical Information System
gNB	Next Generation NodeB
IA	Inteligencia Artificial
ID	Identity
IP	Internet Protocol
KPIs	Key Performance Indicators
Li-Ion	Batería de iones de litio
Li-Po	Batería de polímero de litio
LoS	Line of Sight
MPP	Modelo Predicción Prestaciones
MTOW	Maximal Take Off Weight
PWM	Pulse-Width Modulation
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RP	Raspberry Pi
SD	Secure Digital

UAM	Urban Air Mobility
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USV	Unmanned Surface Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
UE	User Equipment
UFW	Uncomplicated Firewall
USB	Universal Serial Bus
VPN	Red Privada Virtual
vRAN	Virtualized Radio Access Network
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
Wifi	Red inalámbrica de área local

Resumen Ejecutivo

El proyecto SORUS-DRONES se centra en los retos que plantea la integración de vehículos aéreos no tripulados (UAV, UAS, drones) con redes de acceso radioeléctrico virtualizadas (vRAN) y superficies inteligentes reconfigurables (RIS) en el despliegue y funcionamiento de una red B5G.

El diseño y desarrollo de la solución UAV se realizará atendiendo a las necesidades de los casos de uso que permitirán validar los desarrollos alcanzados en los otros subproyectos (vRAN y RIS), así como al estado del arte de la tecnología relacionada con los drones, las comunicaciones y la IA-Edge Computing.

El proceso de análisis de las diferentes soluciones y definición de los prototipos que permitirán realizar las pruebas de validación se desarrollan en la fase de PERFILADO.

El presente documento expone una tercera iteración del desarrollo conceptual y funcional de esta fase de PERFILADO, así como los resultados de las pruebas finales encaminadas a conformar las herramientas requeridas para la definición del prototipo final de proyecto que permitan la consecución de los objetivos del mismo.

1. Introducción

El avance hacia el desarrollo del **PROTOTIPO FINAL** se fundamenta en la consolidación del proceso iterativo que caracteriza la fase de **PERFILADO**. En esta etapa final, se integran los resultados obtenidos en las iteraciones anteriores junto con las últimas pruebas y desarrollos para refinar y optimizar las prestaciones de la solución UAV que se pretende, buscando satisfacer los diferentes requisitos definidos por el proyecto a través de los **Casos de Uso**.

La metodología empleada en el **PERFILADO** se basa en el uso del **Modelo de Predicción de Prestaciones (MPP)**, que define el marco conceptual para el análisis de los diferentes factores y la parametrización de las variables cualitativas y cuantitativas que se han ido definiendo en el proceso, en continua actualización y ampliación para abordar las complejidades y desafíos identificados en las fases intermedias y final.

Este modelo no solo permite evaluar el comportamiento a diferentes niveles de cada sistema y subsistema, sino también su integración funcional en el diseño completo del UAV, ofreciendo estimaciones validadas de prestaciones y proporcionando un marco robusto para la toma de decisiones y la comparación de soluciones.

El **PERFILADO FINAL** enfatiza la validación de las soluciones propuestas mediante diferentes pruebas y análisis con el objetivo de garantizar un desempeño óptimo en términos de autonomía, eficiencia energética, capacidad de carga y adaptabilidad a diversos escenarios operativos.

Los resultados de esta etapa establecen la base para la transición hacia la fase de caracterización del **PROTOTIPADO FINAL**, donde se busca consolidar una solución UAV que cumpla con los estándares de funcionalidad, fiabilidad y adaptabilidad que son propios del proyecto.

En las siguientes secciones se detallan las mejoras incorporadas en el **MPP**, los datos obtenidos de las pruebas realizadas, y su impacto en la evolución del diseño del **PROTOTIPO FINAL**.

2. Casos de Uso y Parametrización

Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, se definieron al comienzo del mismo una serie de **Casos de Uso** alineados con el alcance planteado y se estableció un enfoque de revisión continua de dichos Casos de Uso con el propósito de garantizar su vigencia y efectividad en un entorno tecnológico caracterizado por su constante evolución.

Este enfoque dinámico ha permitido identificar tanto nuevas oportunidades como desafíos emergentes, lo que ha facilitado la adaptación y optimización de parámetros previamente definidos que caracterizasen los escenarios de uso de los prototipos en desarrollo.

Estos ajustes responden a la necesidad de mantener la alineación de los Casos de Uso con los objetivos estratégicos del proyecto, la integración de nuevas tecnologías, así como la incorporación del conocimiento adquirido durante el desarrollo del proyecto, lo que resultado clave para reforzar la factibilidad de los escenarios planteados. De este modo, se ha asegurado que los esfuerzos del proyecto se dirigiesen al análisis de soluciones técnicamente viables, innovadoras y alineadas con las metas establecidas.

Este proceso iterativo de revisión continua no solo garantiza una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta ante cambios, sino que también refuerza el enfoque estratégico del proyecto, asegurando que las soluciones propuestas se mantengan a la vanguardia del estado del arte en UAVs y tecnologías de red.

En la Figura 2.1, se muestra la tabla definida en los estados iniciales de proyecto con los diferentes Casos de Uso establecidos como base de estudio para el proceso iterativo.

Num Caso Uso	Caso de Uso	Escenario:	Requisitos:	Tecnologías aplicables:	Factores relevantes:	Limitaciones:	Solución propuesta
#1	Extensión Dinámica de Cobertura de Red B5G/6G en áreas extensas.	Zona geográfica extensa con cobertura de red limitada por características de la orografía o por la existencia de construcciones en altura, donde se realizan operaciones con drones de forma repetida y frecuente, y se presenta una alta demanda de servicios.	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionar cobertura de red en la zona de referencia con dispositivos que tengan movilidad y puedan adaptarse a escenarios complejo - Alcance operativo de cierta entidad. - Autonomía de vuelo extendida sobre parámetros habituales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. - Navegación avanzada - Comunicación B5G/6G - Sistemas de propulsión híbrida 	<ul style="list-style-type: none"> - Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. - Comunicaciones - Flexibilidad y agilidad operativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomía de vuelo. - Alcance de comunicaciones. - Capacidad de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> -Multirrotor con alta capacidad de carga. -Sistema de alimentación híbrido que le dote autonomía extendida. -Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada. - Antenas RIS embarcadas e integradas
#2	Extensión estática de cobertura de red B5G/6G en zonas de emergencia.	<ul style="list-style-type: none"> -Escenario localizado en situación de emergencia, donde la cobertura de red está limitada por averías o se produce saturación por concentración de un alto número de usuarios. -Se demandan servicios de comunicación que garanticen cobertura de red con estabilidad de conexión, ausencia de interferencias o continuidad de servicio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionar cobertura de red en un área específica con alta demanda en periodos concretos y radio de acción reducido. - Agilidad operativa - Operación continua 	<ul style="list-style-type: none"> Drones con alimentación de energía continua y capacidad de carga. - Comunicación B5G/6G - Alimentación por cable 	<ul style="list-style-type: none"> - Prestaciones del dron en funcionamiento continuo. - Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alcance comunicaciones. -Agilidad operativa presenta alta demanda de recursos y activos. -Capacidad de carga 	<ul style="list-style-type: none"> - Multirrotor con alta capacidad de carga .- Sistema de alimentación por cable que le dote autonomía para operación continua. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada.
#3	Soporte de cobertura y orquestación a enjambre de drones colaborativos operando en un mismo escenario.	<ul style="list-style-type: none"> -Escenario localizado donde operan un grupo de drones de forma coordinada. -Navegación avanzada de los drones para operar en escenario U-Space complejo --Funciones avanzadas de red, IA y computación. 	<ul style="list-style-type: none"> -Proporcionar cobertura de red en la zona de referencia con dispositivos que tengan movilidad y puedan adaptarse a escenarios complejos. -Alcance operativo de cierta entidad. -Autonomía de vuelo extendida sobre parámetros habituales. -Se requiere de coordinación centralizada. 	<ul style="list-style-type: none"> -Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. -Navegación avanzada. -Comunicación B5G/6G -IA, Edge Computing. 	<ul style="list-style-type: none"> -Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. -Comunicaciones. -Integración de sistemas complejos y computación distribuida -Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue. 	<ul style="list-style-type: none"> -Autonomía de vuelo. -Alcance de comunicaciones -Capacidad de carga. -Despliegue de funcionalidades 	<ul style="list-style-type: none"> -Multirrotor con alta capacidad de carga. - Sistema de alimentación híbrido que le dote autonomía extendida. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada y orquestación de drones en operación colaborativa. - Antenas RIS embarcadas e integradas

Num Caso Uso	Caso de Uso	Escenario:	Requisitos:	Tecnologías aplicables:	Factores relevantes:	Limitaciones:	Solución propuesta
#4	Monitorización y levantamiento de mapas de cobertura para la generación de cartografía de red B5G/6G que permita la gestión avanzada y la respuesta temprana a situaciones que demanden extensión de cobertura.	<ul style="list-style-type: none"> - Escenario localizado en situación de emergencia, donde la cobertura de red está limitada por averías o se produce saturación por concentración de un alto número de usuarios. - Se busca un conocimiento de detallado de la distribución de la cobertura de red para la toma rápida de decisiones en situaciones concretas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionar cobertura de red en un área específica con alta demanda en periodos concretos y radio de acción reducido. - Agilidad operativa. - Funciones avanzadas de red, IA y computación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. - Navegación avanzada. - Comunicación B5G/6G - IA, Edge Computing, GIS 	<ul style="list-style-type: none"> - Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. - Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue. - Procesamiento basado en IA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomía de vuelo. - Alcance de comunicaciones - Capacidad de carga. - Despliegue de funcionalidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Multirrotor con alta capacidad de carga. - Sistema de alimentación híbrido que le dote autonomía extendida. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada y orquestación de drones en operación colaborativa. - Antenas RIS embarcadas e integradas
#5	Gestión avanzada de inspecciones de activos con drones para el procesamiento de datos acelerado y la obtención de resultados casi en tiempo real.	<p>Escenario localizado de activo a inspeccionar con generación de una elevada cantidad de datos complejos (imágenes, localización...).</p> <p>Se busca un procesamiento acelerado de los datos para la obtención de resultados casi en tiempo real.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionar cobertura de red en un área específica con alta demanda de transferencia de datos y radio de acción variable - Alcance operativo de cierta entidad. - Funciones avanzadas de red, IA y computación 	<ul style="list-style-type: none"> - Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. - Navegación avanzada. - Comunicación B5G/6G - IA, Edge Computing, GIS. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. - Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue - Procesamiento basado en IA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomía de vuelo. - Alcance de comunicaciones - Capacidad de carga. - Despliegue de funcionalidades 	<ul style="list-style-type: none"> - Multirrotor con alta capacidad de carga. - Sistema de alimentación híbrido que le dote autonomía extendida. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada - Sensórica con computación IA embarcadas para procesamiento avanzado.

Figura 2.1 Tabla resumen Casos de Uso

A lo largo del proceso iterativo se han podido simplificar los escenarios en que van a operar los UAVs en desarrollo, atendiendo a las tecnologías, factores relevantes y limitaciones que permiten atender los requisitos de dichos escenarios, reduciendo así las posibles soluciones propuestas y a analizar. Esta labor de síntesis, desarrollada con apoyo de la herramienta de predicción de prestaciones, MPP, elaborada, junto con los requerimientos de flexibilidad y adaptabilidad, han sido fundamental para llegar a soluciones factibles desde los puntos de vista técnico y operativo, y económicamente viables, lo que resulta fundamental para su potencial aplicación en escenarios reales.

En esta línea de simplificación, sobre el **Caso de Uso 3**, relacionado con la orquestación de enjambres de drones, se ha concluido que su implementación no es viable dentro del alcance del proyecto. Las barreras legislativas actuales, que imponen restricciones significativas para la operación simultánea y coordinada de múltiples UAVs (los cuales deben estar operados por una sola persona lo que limita la operación simultánea), los retrasos que está acumulando la implementación del U-Space como espacio aéreo colaborativo para la operación de drones (UAVs, USVs, UGVs...) por diferentes operadores en un escenario común (las Administraciones Aéreas europeas y nacionales no están implementando las herramientas necesarias para el desarrollo del U-Space en el plazo comprometido), así como los desarrollos específicos necesarios para hacer funcionar una solución de este tipo (por su complejidad técnica para coordinar diferentes dispositivos y por su carácter específico y alejado del resto de desarrollos del proyecto) exceden el alcance, los plazos y los recursos disponibles en el proyecto, lo que motiva su descarte en esta fase de desarrollo.

En lo que se refiere al **Caso de Uso 5**, centrado en la gestión avanzada de inspecciones de activos con drones para el procesamiento de datos acelerado y la obtención de resultados casi en tiempo real, se considera que, aunque se trata de un interesante ejercicio de aplicación práctica que puede tener un mercado potencial atractivo, está demasiado condicionado por tecnologías no alineadas con el proyecto, como puede ser el caso de Análisis de Datos capturados o técnicas DevOps para el desarrollo de herramientas de gestión de datos en entorno cloud. Mientras la captura de datos puede ser realizada por UAVs con requisitos básicos, el éxito de la operación radica en el correcto desarrollo y aplicación de esas herramientas no alineadas con el proyecto SORUS, por lo que se decide descartar este caso de uso como objetivo de cumplimiento de requisitos para el PROTOTIPO FINAL.

Para los **Casos de Uso 1 y 2**, debido a su similitud en los apartados operativo y tecnológicos para operar en escenarios dedicados a la extensión de cobertura de red 5G/6G, permiten una única solución que puede adaptarse con equipamiento auxiliar adecuado a diferentes condiciones, lo que facilita el desarrollo de un prototipo para dicha solución con aplicaciones específicas en áreas extensas y en situaciones de emergencia. Esta unificación permite optimizar recursos y esfuerzos, garantizando un análisis más eficiente y coherente dentro de los tiempos establecidos del proyecto.

Casos de Uso 1 y 2	Solución propuesta para los casos de uso 1 & 2
Extensión Dinámica y Estática de Cobertura de Red B5G/6G en áreas extensas y en zonas de emergencias.	<ul style="list-style-type: none"> -Multirroto con alta capacidad de carga. -Sistema de alimentación avanzado que le dote de autonomía extendida. - Diseño de operación que permita la operación continua cuando se requiera. -Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada. - Carga de Pago intercambiable (Antenas de extensión de red embarcadas e integradas, otro tipo de carga de pago...)

En el **Caso de Uso 4**, centrado en la monitorización y levantamiento de mapas de cobertura para la generación de cartografía de red B5G/6G que permita la gestión avanzada y la respuesta temprana a situaciones que demanden extensión de cobertura, plantea un escenario en el que la carga de pago es esencial para el éxito del mismo, por lo que se requiere de capacidades de flexibilidad y adaptabilidad de la solución, las cuales compatibilizan muy bien con los requisitos de los casos 1 y 2.

Caso de Uso 4	Solución propuesta para los casos de uso 1 & 2
Monitorización y levantamiento de mapas de cobertura para la generación de cartografía de red B5G/6G que permita la gestión avanzada y la respuesta temprana a situaciones que demanden extensión de cobertura.	<ul style="list-style-type: none"> -Multirroto con alta capacidad de carga. - Sistema de alimentación avanzado que le dote de autonomía extendida. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada y orquestación de drones en operación colaborativa. - Carga de pago adecuada para el levantamiento de mapas de cobertura.

Por lo tanto, según lo expuesto, la tabla final de casos de uso se ha optimizado y queda como muestra la siguiente imagen:

Num Caso Uso	Caso de Uso	Escenario:	Requisitos:	Tecnologías aplicables:	Factores relevantes:	Limitaciones:	Solución propuesta
#1 y #2	Extensión Dinámica y Estática de Cobertura de Red B5G/6G en áreas extensas y zonas de emergencia.	Zona geográfica extensa con cobertura de red limitada por características de la orografía o por la existencia de construcciones en altura, donde se realizan operaciones con drones de forma repetida y frecuente, y se presenta una alta demanda de servicios. -Escenario localizado en situación de emergencia, donde la cobertura de red está limitada por averías o se produce saturación por concentración de un alto número de usuarios. -Se demandan servicios de comunicación que garanticen cobertura de red con estabilidad de conexión, ausencia de interferencias o continuidad de servicio.	- Proporcionar cobertura de red en la zona de referencia con dispositivos que tengan movilidad y puedan adaptarse a escenarios complejo - Alcance operativo de cierta entidad. - Autonomía de vuelo extendida sobre parámetros habituales. - Proporcionar cobertura de red en un área específica con alta demanda en periodos concretos y radio de acción reducido. - Agilidad operativa - Diseño de Operación continua	- Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. - Navegación avanzada - Comunicación B5G/6G - Sistemas de propulsión híbrida	- Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. - Comunicaciones - Flexibilidad y agilidad operativa. - Prestaciones del dron en operación continua. - Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue.	- Autonomía de vuelo. - Alcance de comunicaciones. - Capacidad de carga. -Agilidad operativa presenta alta demanda de recursos y activos.	-Multirroto con alta capacidad de carga. -Sistema de alimentación avanzado que le dote de autonomía extendida. - Diseño de operación que permita la operación continua cuando se requiera. -Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada. - Carga de Pago intercambiable (Antenas de extensión de red embarcadas e integradas, otro tipo de carga de pago...)
#4	Monitorización y levantamiento de mapas de cobertura para la generación de cartografía de red B5G/6G que permita la gestión avanzada y la respuesta temprana a situaciones que demanden extensión de cobertura.	- Escenario localizado en situación de emergencia, donde la cobertura de red está limitada por averías o se produce saturación por concentración de un alto número de usuarios. - Se busca un conocimiento de detallado de la distribución de la cobertura de red para la toma rápida de decisiones en situaciones concretas.	- Proporcionar cobertura de red en un área específica con alta demanda en periodos concretos y radio de acción reducido. - Agilidad operativa. - Funciones avanzadas de red, IA y computación.	- Drones con capacidad de carga, autonomía y alcance extendidos. - Navegación avanzada. - Comunicación B5G/6G - IA, Edge Computing, GIS	- Prestaciones del dron para atender requisitos contradictorios entre sí. - Flexibilidad y agilidad operativa para el despliegue. - Procesamiento basado en IA.	- Autonomía de vuelo. - Alcance de comunicaciones - - Capacidad de carga. - Despliegue de funcionalidades.	-Multirroto con alta capacidad de carga. - Sistema de alimentación híbrido que le dote autonomía extendida. - Integración de SORUS BOX como paquete de comunicación y computación avanzada y orquestación de drones en operación colaborativa. - Antenas RIS embarcadas e integradas

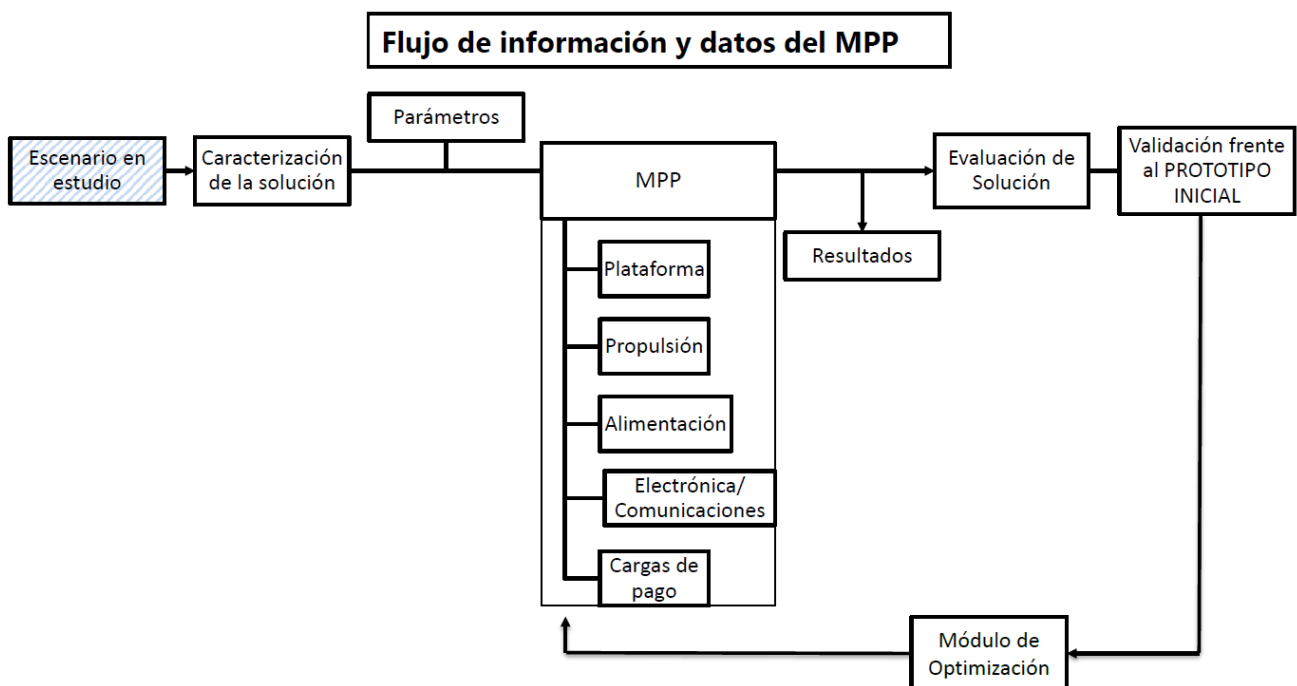
3. Desarrollo del MPP para el PERFILADO FINAL

El MPP tiene como objetivo sistematizar un flujo de trabajo definido y perfilado con el avance del proyecto y por las exigencias de los diferentes Casos de Uso. Su propósito es ofrecer una herramienta metodológica que permita evaluar las prestaciones de las soluciones UAV, especialmente para abordar las dificultades que se presentan al plasmar las variables cualitativas en un modelo algorítmico.

El diagrama funcional representa un proceso iterativo y estructurado que permite:

1. Caracterizar las necesidades iniciales del escenario en estudio.
2. Analizar y evaluar el desempeño de soluciones UAV a través del MPP.
3. Comparar los resultados con un prototipo inicial para validar su viabilidad.
4. Optimizar las prestaciones mediante un módulo especializado.

Este enfoque metodológico permite una toma de decisiones fundamentada y asegura que la solución final sea acorde a las demandas del escenario planteado.



En el entregable **6G_SORUS_DRONES_A2.1_E2_Perfilado Intermedio**, se presentó un análisis detallado del Modelo de Predicción de Prestaciones (MPP) y de las ventanas funcionales diseñadas para su primer prototipo. Este modelo metodológico fue desarrollado con el objetivo de evaluar, de forma integral, las prestaciones de las soluciones UAV, considerando los requisitos definidos para cada Caso de Uso. Sin embargo, a medida que el proyecto ha avanzado, han surgido dificultades técnicas y desafíos que han requerido una reestructuración y actualización de la interfaz del MPP.

La revisión ha implicado una actualización de los flujos de trabajo y métricas utilizadas, manteniendo las etapas de evaluación correspondientes a los módulos principales: PLATAFORMA DE VUELO, PROPULSIÓN, ALIMENTACIÓN, ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES, Y CARGA DE PAGO. Este esfuerzo se ha centrado en optimizar la funcionalidad de la herramienta, permitiendo que las evaluaciones sean más eficientes y precisas.

El propósito principal de esta reestructuración es garantizar que el MPP pueda proporcionar resultados más detallados y relevantes para la toma de decisiones, al mismo tiempo que se adapta a los nuevos escenarios y parámetros identificados durante las iteraciones del proyecto. La flexibilidad incorporada permite a la herramienta integrar nuevos datos y ajustarse a las necesidades cambiantes del desarrollo, consolidándose como un componente central en el diseño del prototipo final del UAV.

El desarrollo del MPP sigue un enfoque iterativo que progresa en paralelo con los avances del proyecto. Esta metodología permite que el modelo se ajuste constantemente a los requisitos emergentes y refine sus capacidades en función de los resultados obtenidos. En su versión actual, el MPP cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en Python, que facilita la interacción con los datos y resultados del modelo. Los datos sobre los que se basa el MPP están organizados en el archivo **MPP_V2.xlsx**, que recoge información de pruebas, configuraciones técnicas y parámetros evaluados.

La combinación de una interfaz gráfica intuitiva y una base de datos centralizada mejora significativamente la usabilidad y precisión del MPP.

La primera pestaña que se presenta es la siguiente (Figura 3.1):

MODELO DE PREDICCIÓN DE PRESTACIONES

PLATAFORMA DE VUELO | DISEÑO NUEVO DRON | PROPULSIÓN

Búsqueda por parametrización

ALCANCE (km): VLOS
 TIPO DE UAV: Multirrotor
 NÚMERO DE MOTORES: 4
 CARGA DE PAGO: 0 - <1.5kg
 MTOM (g): < 10kg
 TIEMPO DE VUELO: <10 min

Búsqueda por modelo específico

FABRICANTE: [dropdown]
 MODELO: [dropdown]

Plataformas que cumplen con los requisitos establecidos:

	Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tip
1	AEROTOOLS	AT6	Multirrotor	6	T-Motor	4014-9 400KV	T-Motor	1758	Lipo B
2	AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo B
3	DJI	Matrice 300	Multirrotor	4	DJI	6009	DJI	2110	Lipo B
4	DJI	Matrice 600	Multirrotor	6	DJI	6010	DJI	2170	Lipo B
5	DJI	AGRAS T30	Multirrotor	nan	nan	nan	DJI	3820	Lipo B
6	FOXTECH	BABY SHARK	VTOL	4 lifting motors...	nan	nan	Spare Propeller	nan	Lipo B

MODELO 1

Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1 AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	nan

MODELO 2

Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1 AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	nan

MODELO 3

Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1 AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	nan

Figura 3.1 Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP

La pestaña **PLATAFORMA DE VUELO** del MPP se estructura en tres bloques principales, cada uno diseñado para cumplir con funciones específicas que optimizan el proceso de selección y evaluación de UAVs.

El primer bloque (Figura 3.2) actúa como un **buscador avanzado**, permitiendo al usuario realizar una búsqueda detallada en función de los requisitos del escenario planteado. Este bloque ofrece una parametrización basada en diversas variables clave, como:

- **Alcance Operativo:** Esta variable debe evaluarse cuidadosamente en función de los requisitos legales, administrativos y operativos específicos del escenario en cuestión. Los escenarios de operación pueden incluir alcance dentro de la línea de visión visual (VLOS), más allá de la línea de visión visual (BVLOS) o mediante sistemas cautivos (tethered). La selección del alcance adecuado no solo está condicionada por las necesidades técnicas y funcionales del dron, sino también por las regulaciones vigentes, la disponibilidad de infraestructura y las condiciones específicas del entorno operativo. Por ello, es fundamental realizar un análisis detallado para garantizar el cumplimiento normativo y la viabilidad técnica, maximizando al mismo tiempo la eficiencia y la seguridad de la operación.

Este parámetro ha sido deshabilitado del modelo de análisis cuantitativo debido a la complejidad y variabilidad de los factores implicados. Se ha determinado que es más adecuado abordar esta decisión de forma cualitativa, permitiendo un análisis contextualizado y flexible que considere las especificidades de cada escenario operativo.

- **Tipo de UAV:** Ofrece la posibilidad de filtrar entre configuraciones específicas, como multirrotores, alas fijas o sistemas de despegue y aterrizaje vertical (VTOL).
- **Número de motores:** Este parámetro permite definir la cantidad de motores requeridos, un factor crítico para la estabilidad, maniobrabilidad y capacidad de carga del UAV.
- **Carga de pago:** Facilita la selección en función del peso y tipo de carga útil que se necesita transportar, asegurando compatibilidad con los sistemas embarcados.
- **MTOM (Maximum Take-Off Mass):** Considera la masa máxima al despegue del UAV, lo cual es esencial para garantizar que las opciones cumplan con los requisitos normativos y operativos.
- **Tiempo de vuelo mínimo deseado:** Permite establecer un umbral mínimo de autonomía, garantizando que el dron seleccionado pueda cumplir con los requisitos temporales de la misión.

Además de la parametrización general, este bloque incluye una opción de *Búsqueda por modelo específico*, que resulta especialmente útil cuando se busca un equipo concreto. Esta funcionalidad permite realizar un filtrado detallado por fabricante y modelo, facilitando la identificación precisa de drones que ya son conocidos o han demostrado su eficacia en escenarios similares.

Figura 3.2 Bloque 1- Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP

El segundo bloque (Figura 3.3) está diseñado para mostrar las opciones disponibles, es decir, los drones candidatos que han sido evaluados durante el desarrollo del proyecto. Este bloque refleja un proceso iterativo en el que se van incorporando nuevos modelos a medida que se identifican como posibles soluciones para cumplir con los requisitos establecidos en los escenarios planteados.

Este bloque dinámico se activa una vez que el usuario realiza una parametrización detallada o utiliza la búsqueda por modelo específico en el primer bloque. Al pulsar el botón BUSCAR, se presentan los resultados filtrados según los parámetros seleccionados. Cada resultado incluye información detallada sobre las características y prestaciones de los drones candidatos, lo que permite al usuario comparar opciones y tomar decisiones informadas.

El enfoque iterativo garantiza que el bloque se mantenga actualizado con las últimas evaluaciones y resultados obtenidos en el proyecto. Esto no solo permite integrar modelos probados previamente, sino también incorporar nuevas opciones que surgen a medida que avanza el proyecto, asegurando que las decisiones se basen en un análisis completo y actualizado. Este bloque, por tanto, funciona como una herramienta central para identificar los UAV más adecuados, optimizando el proceso de selección y evaluación en tiempo real.

MODELO DE PREDICCIÓN DE PRESTACIONES

PLATAFORMA DE VUELO | DISEÑO NUEVO DRON | PROPULSIÓN

Búsqueda por parametrización

ALCANCE (km) VLOS

TIPO DE UAV Multirrotor

NÚMERO DE MOTORES 4

CARGA DE PAGO 0 - <1.5kg

MTOM (g) < 10kg

TIEMPO DE VUELO <10 min

Búsqueda por modelo específico

FABRICANTE

MODELO

BUSCAR LIMPIAR BÚSQUEDA

Plataformas que cumplen con los requisitos establecidos:

	Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tip
1	AEROTOOLS	AT6	Multirrotor	6	T-Motor	4014-9 400KV	T-Motor	1758	Lipo B
2	AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo B
3	DJI	Matrice 300	Multirrotor	4	DJI	6009	DJI	2110	Lipo B
4	DJI	Matrice 600	Multirrotor	6	DJI	6010	DJI	2170	Lipo B
5	DJI	AGRAS T30	Multirrotor	nan	nan	nan	DJI	3820	Lipo B
6	FOYTECH	BABY SHARK	VTOL	4 lifting motors...	nan	nan	Spare Propeller	nan	Lipo B

MODELO 1

Fabricante AEROTOOLS

Modelo AT15

	Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1	AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	2.0

MODELO 2

Fabricante AEROTOOLS

Modelo AT15

	Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1	AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	2.0

MODELO 3

Fabricante AEROTOOLS

Modelo AT15

	Empresa	Equipo	Tipo	Num_motores	Marca_motor	Modelo_motor	Marca_helice	Modelo_helice	Tipo_bateria	capacidad_bateria
1	AEROTOOLS	AT15	Multirrotor	6	nan	nan	nan	nan	Lipo Battery	2.0

Figura 3.3 Bloque 2- Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP

El tercer bloque (Figura 3.4) está diseñado para realizar comparativas detalladas entre diferentes drones candidatos. Este bloque permite al usuario seleccionar hasta tres modelos de UAV, previamente filtrados y mostrados en el segundo bloque, para realizar un análisis comparativo de sus características y prestaciones.

La funcionalidad incluye la presentación de parámetros clave de cada modelo, como capacidad de carga, autonomía, tipo de propulsión, MTOM, y otras especificaciones técnicas relevantes. Al colocar los modelos seleccionados en una tabla o formato visual comparable, este bloque facilita una evaluación rápida y eficiente de las ventajas y limitaciones de cada opción, ayudando al usuario a identificar el modelo que mejor se ajusta a los requisitos del escenario operativo.

También considera las limitaciones inherentes a los sistemas cerrados, donde no siempre se dispone de todas las especificaciones técnicas detalladas. Esto puede dificultar la comparación precisa entre modelos, ya que algunas características clave podrían no estar claramente especificadas por los fabricantes. En estos casos, el análisis comparativo se enfoca en los datos disponibles y en la experiencia previa, evaluando la viabilidad de estos sistemas dentro de los requisitos del proyecto. Este enfoque asegura que, incluso con información limitada, se puedan tomar decisiones informadas basadas en los parámetros accesibles.

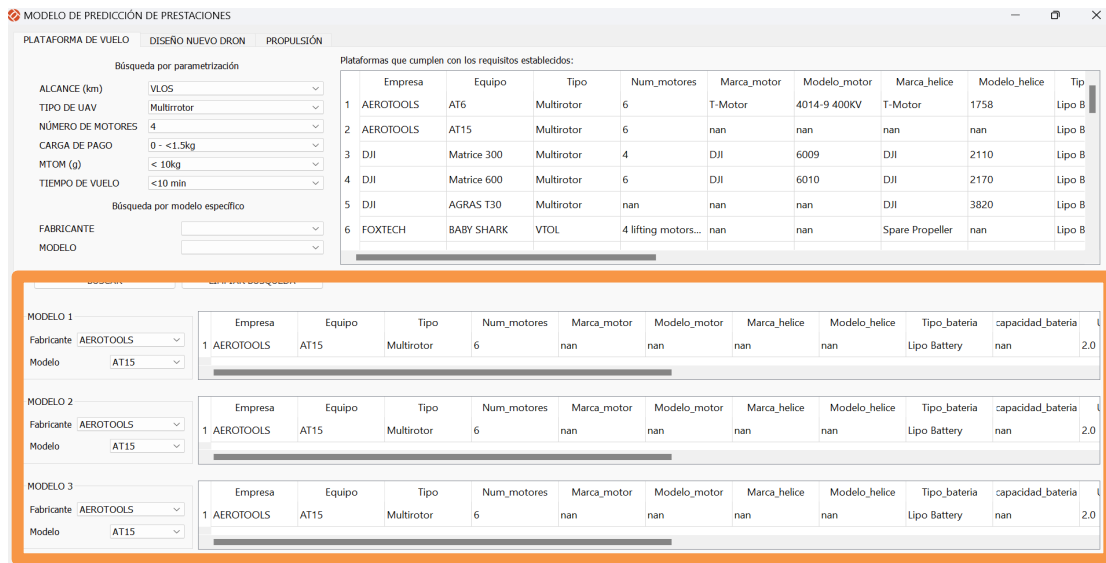


Figura 3.4 Bloque 3 - Pestaña PLATAFORMA DE VUELO - Interfaz MPP

La pestaña **DISEÑO NUEVO DRON** del MPP está concebida para que se pueda configurar un dron desde cero, adaptándolo a los requisitos específicos de los escenarios operativos. Esta herramienta divide el diseño en dos partes principales: el **CÁLCULO PESO EQUIPO**, donde se establecen los parámetros iniciales del dron, y la **ESTIMACIÓN TIEMPO DE VUELO**, que proporcionan resultados estimados basados en las configuraciones seleccionadas.

En la sección de *parámetros iniciales*, los usuarios definen aspectos básicos del dron como su nombre, que actúa como identificador único para la configuración, y el número de motores, seleccionable mediante un control deslizante. También se incluye el MTOM (Maximum Take-Off Mass), que especifica la masa máxima al despegue en gramos. Este último parámetro es crucial, ya que determina la capacidad de carga final del dron.

La sección de *carga de pago* permite detallar la capacidad útil del dron, incluyendo la definición del tipo de soporte necesario para la carga útil. Además, se especifica el peso real de la carga útil, expresado en gramos, un factor que influye directamente en el tiempo de vuelo y en la configuración del sistema de propulsión.

El conjunto principal se enfoca en los componentes físicos del dron, como el chasis, los motores, los variadores y los sistemas de soporte para la batería y la placa base. Este apartado también considera elementos adicionales como la posibilidad de incluir una cúpula 3D para proteger los componentes internos.

En la sección de *sistema de alimentación*, los usuarios pueden seleccionar el tipo de batería, opciones convencionales como LiPo o Li-ion, hasta celdas de hidrógeno. Se especifican parámetros clave como el número de celdas, el voltaje por celda, la capacidad en amperios-hora y la conexión en serie o paralelo, que impactan directamente en la autonomía y potencia del dron.

La configuración incluye también aspectos relacionados con las hélices y acoples, donde se define el modelo de hélice y los sistemas de fijación, y el tren de aterrizaje, permitiendo seleccionar opciones como sistemas retráctiles. Asimismo, se detalla el anclaje de soporte, incluyendo materiales y conectores necesarios para la integración de la electrónica.

En el apartado de *electrónica y comunicaciones*, se configuran componentes esenciales como la placa de vuelo, GPS, módulos de energía y sistemas de comunicación, asegurando la conectividad y operatividad del dron. Elementos como el power module y los reguladores de voltaje (BEC) también se consideran en este apartado.

Finalmente, la sección de *ESTIMACIÓN TIEMPO DE VUELO* presenta un detalle completo de la configuración, incluyendo parámetros como el peso total del dron, la carga útil, el tiempo de vuelo calculado estimado, la potencia requerida por motor y la eficiencia general del sistema. Esto proporciona a los usuarios una visión clara del rendimiento del dron diseñado, facilitando decisiones informadas y ajustes antes de pasar a la etapa de prototipado.

Figura 3.5 Pestaña DISEÑO NUEVO DRON - Interfaz MPP

Una funcionalidad adicional de esta pestaña es el botón **AÑADIR SISTEMA**, que permite guardar la configuración realizada por el usuario. Este botón facilita la gestión de los diseños creados, almacenándolos para su posterior consulta, comparación o modificación. Con esta opción, se asegura que las configuraciones personalizadas queden registradas, evitando la necesidad de repetir procesos y permitiendo un acceso rápido a modelos previamente definidos.

La pestaña **PROPULSIÓN** (Figura 3.6) está diseñada para integrar modelos de predicción de las prestaciones de un conjunto motor-hélice, con el objetivo de analizar y visualizar cómo el conjunto seleccionado se comporta en función de diversos parámetros físicos. Entre estos parámetros destacan el empuje, el consumo energético, la eficiencia y otros indicadores clave que permitan evaluar el rendimiento del sistema.

En la interfaz, el usuario puede seleccionar el conjunto deseado indicando tanto el fabricante como el modelo del motor y la hélice.

En el caso de que existan ensayos previos para la combinación seleccionada, los resultados serán presentados en forma de gráficos y elementos visuales que permitan un entendimiento intuitivo de los datos. Si no se dispone de datos experimentales, se utilizarán técnicas de extrapolación basadas en modelos de predicción ya desarrollados y ajustados según las metodologías descritas en el apartado correspondiente del proyecto.

Actualmente, el desarrollo de esta pestaña se encuentra en progreso, ya que los modelos de predicción implican una alta complejidad y requieren un proceso iterativo de implementación y mejora continua. Este enfoque asegura que las estimaciones sean cada vez más precisas y confiables conforme avance de los desarrollos hacia la solución UAV final. El refinamiento de estos modelos permitirá una representación robusta y adaptable de las prestaciones de cualquier combinación motor-hélice evaluada.

The screenshot shows the 'PROPULSIÓN' (Propulsion) tab in the 'MODELO DE PREDICIÓN DE PRESTACIONES' (Performance Prediction Model) interface. It features two selection panels on the left for 'MOTOR' and 'HÉLICE' (Propeller), each with 'FABRICANTE' (Manufacturer) and 'MODELO' (Model) dropdown menus. The 'MOTOR' panel is set to 'T-MOTOR' and 'MN4010'. The 'HÉLICE' panel is set to 'T-MOTOR' and 'P13*4.4'. The main area contains two tables of predicted performance data.

	fabricante	modelo	KV	DIAMETER	HEIGHT	BOBINAS	POLOS	SHAFT_D_IN(MM)	SHAFT_D_OUT(MM)	BEA
1	T-MOTOR	MN4010	370	44.7	30.5	18	24	4	4	nan
2	T-MOTOR	MN4010	475	44.7	30.5	18	24	4	4	nan
3	T-MOTOR	MN4010	580	44.7	30.5	18	24	4	4	nan

	fabricante	modelo	DIAMETER	PITCH	OPELLER_WEIGHT	WEIGHT_ERROR	TRHUST_LIM(KG)	MIN_OPT_RPM	MAX_OPT_RPM	PR
1	T-MOTOR	P13*4.4	13	4.4	14.2	0.0	4.5	5000	8000	41.9

Figura 3.6 Pestaña PROPULSIÓN - Interfaz MPP

4. Resultados de la tercera iteración del MPP

La fase de **PERFILADO FINAL** se ha desarrollado continuando con el enfoque de las fases anteriores, sobre la base de la generación de datos y documentación a partir de diversas fuentes, y la proyección basada en el conocimiento y experiencia acumulada por AEROTOOLS con los avances obtenidos desde el inicio del proyecto. Esta etapa tiene como objetivo consolidar una solución que cumpla con los objetivos definidos en el proyecto, mediante un análisis detallado y la ejecución de pruebas específicas que aseguren un desempeño óptimo en los distintos escenarios operativos previstos.

Este perfilado recoge los resultados de iteraciones previas y aprovecha las capacidades del Modelo de Predicción de Prestaciones (MPP), una herramienta clave para estructurar el flujo de información y evaluar objetivamente las distintas alternativas de diseño.

En esta fase, se han incorporado nuevas pruebas y mediciones que permiten una mejor convergencia hacia configuraciones de UAV que destacan por su eficiencia y rendimiento, respondiendo a los requisitos técnicos definidos por los Casos de Uso.

El trabajo se ha organizado en torno a los módulos del MPP, que abarcan las áreas críticas del diseño del UAV, siguiendo los flujos de trabajo que se recogen en las figuras siguientes:

- En el apartado de **Plataforma de Vuelo**, realizando análisis y pruebas para validar materiales y diseños, así como análisis funcionales y económicos que permiten optimizar configuraciones (Multirroto, VTOL, etc). Las pruebas en curso buscan asegurar que el diseño del chasis y otros componentes estructurales soporten las demandas operativas específicas, siguiendo el flujo de trabajo de la Figura 4.1.

Para la **PLATAFORMA DE VUELO**:

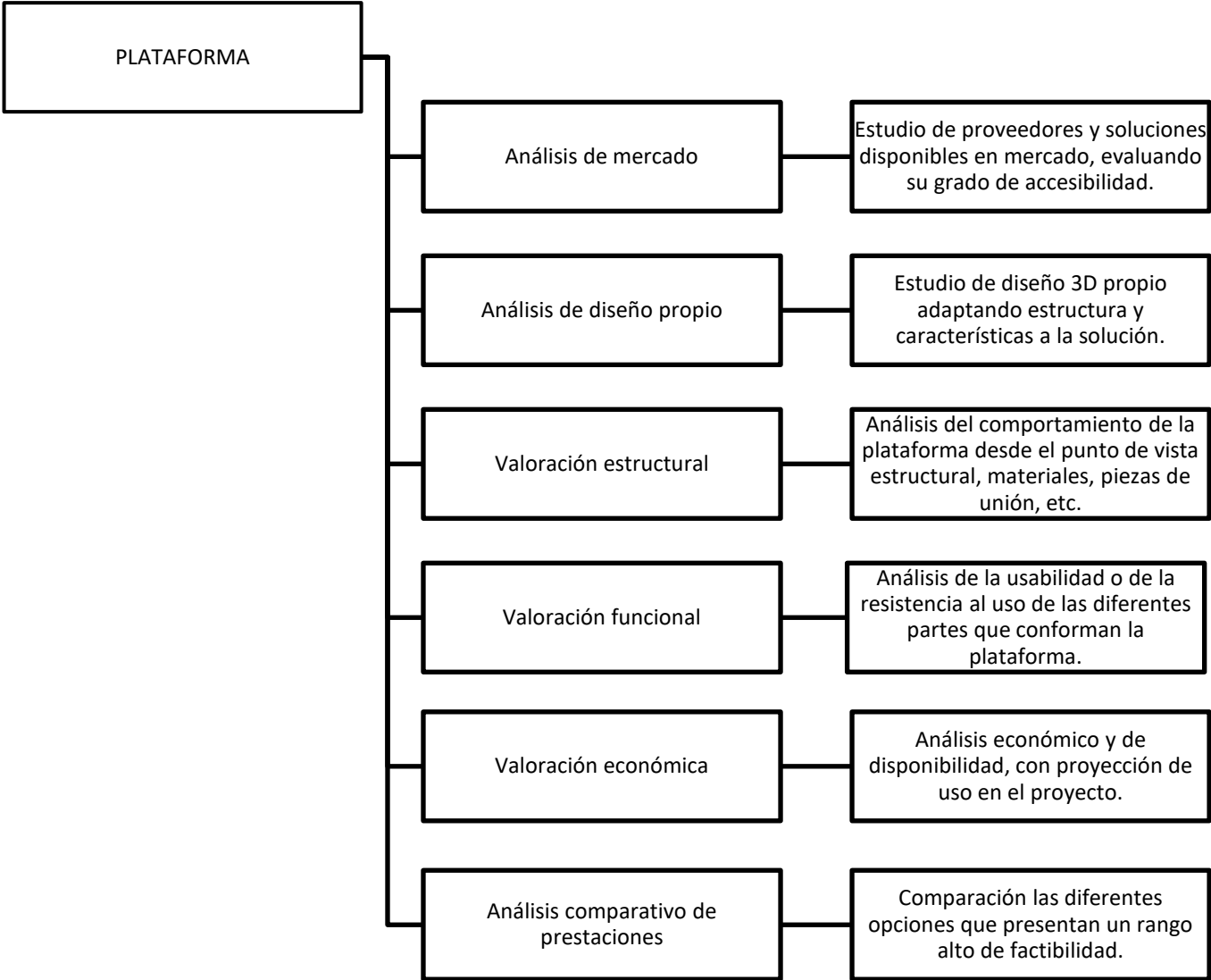


Figura 4.1 Diagrama funcional de la Plataforma de Vuelo

- El módulo de **Propulsión** se ha centrado en seleccionar y probar distintas combinaciones de motores y hélices, optimizando parámetros como empuje y eficiencia energética, con objeto de acumular conocimiento crucial para la selección inicial y la operación de los equipos.. Además, se han explorado soluciones híbridas que extienden la autonomía, cruciales para escenarios que requieren un rendimiento prolongado. (Figura 4.2)

Para la **PROPULSIÓN**:

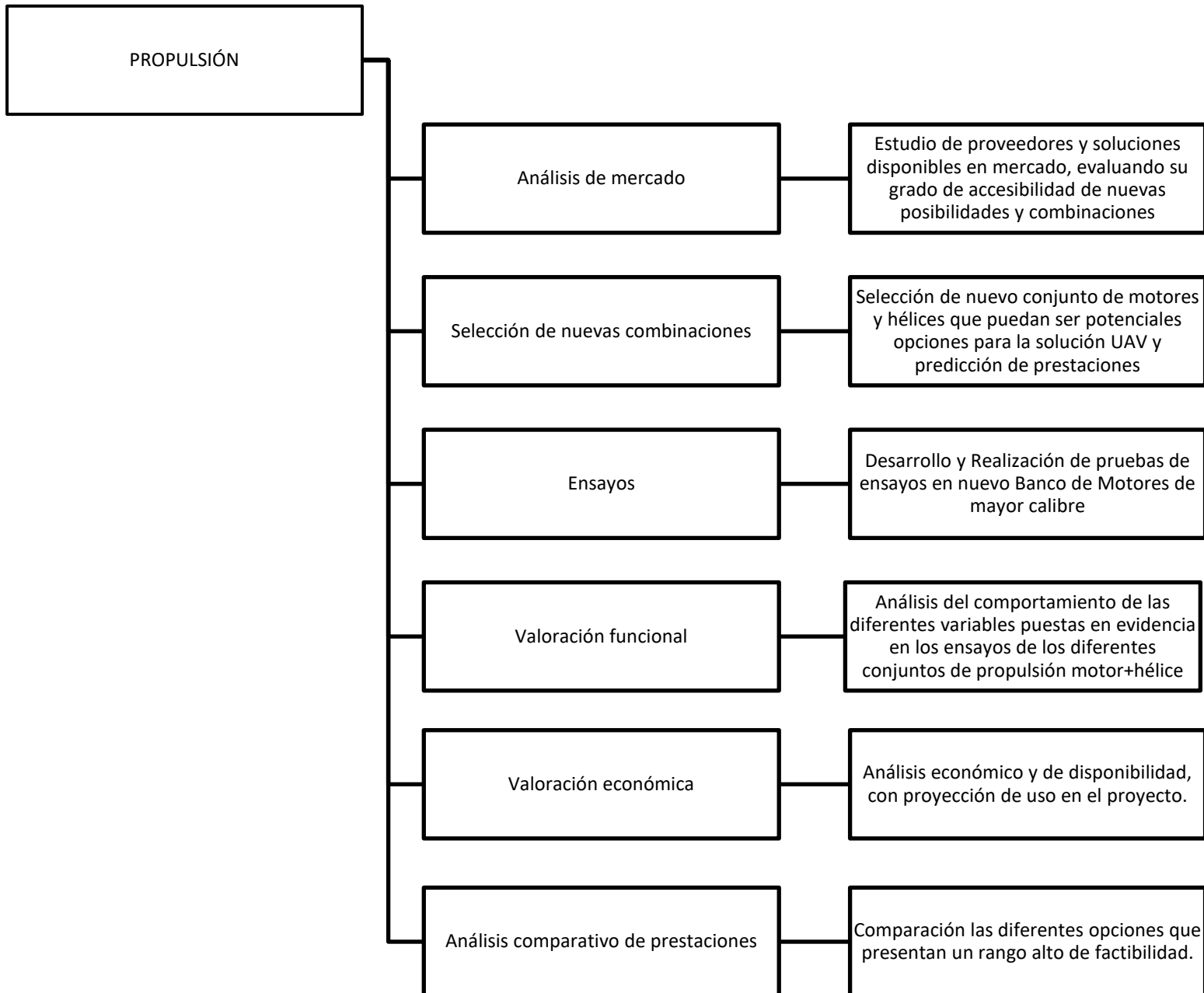


Figura 4.2 Diagrama funcional de la Propulsión

- Por su parte, en el Sistema de **Alimentación**, se han evaluado tecnologías como baterías de litio y celdas de hidrógeno, analizando su viabilidad para aumentar la capacidad operativa del dron sin comprometer su maniobrabilidad. (Figura 4.3)

Para la **ALIMENTACIÓN**:

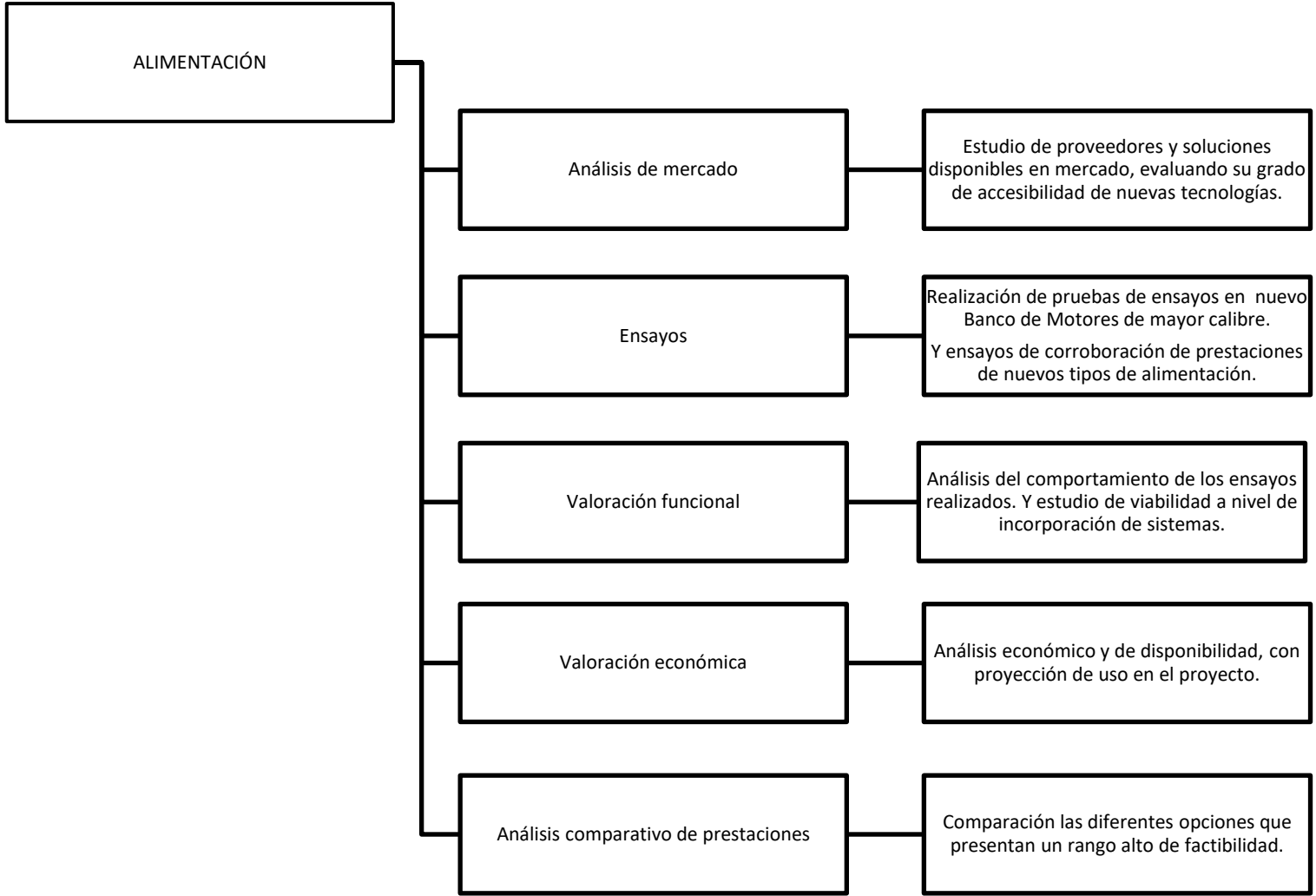


Figura 4.3 Diagrama funcional de la Alimentación

- En el ámbito de **Electrónica y Comunicaciones**, se han llevado a cabo pruebas de compatibilidad y validación de sistemas de control, navegación y transferencia de datos. (Figura 4.4)

Para la **ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**:

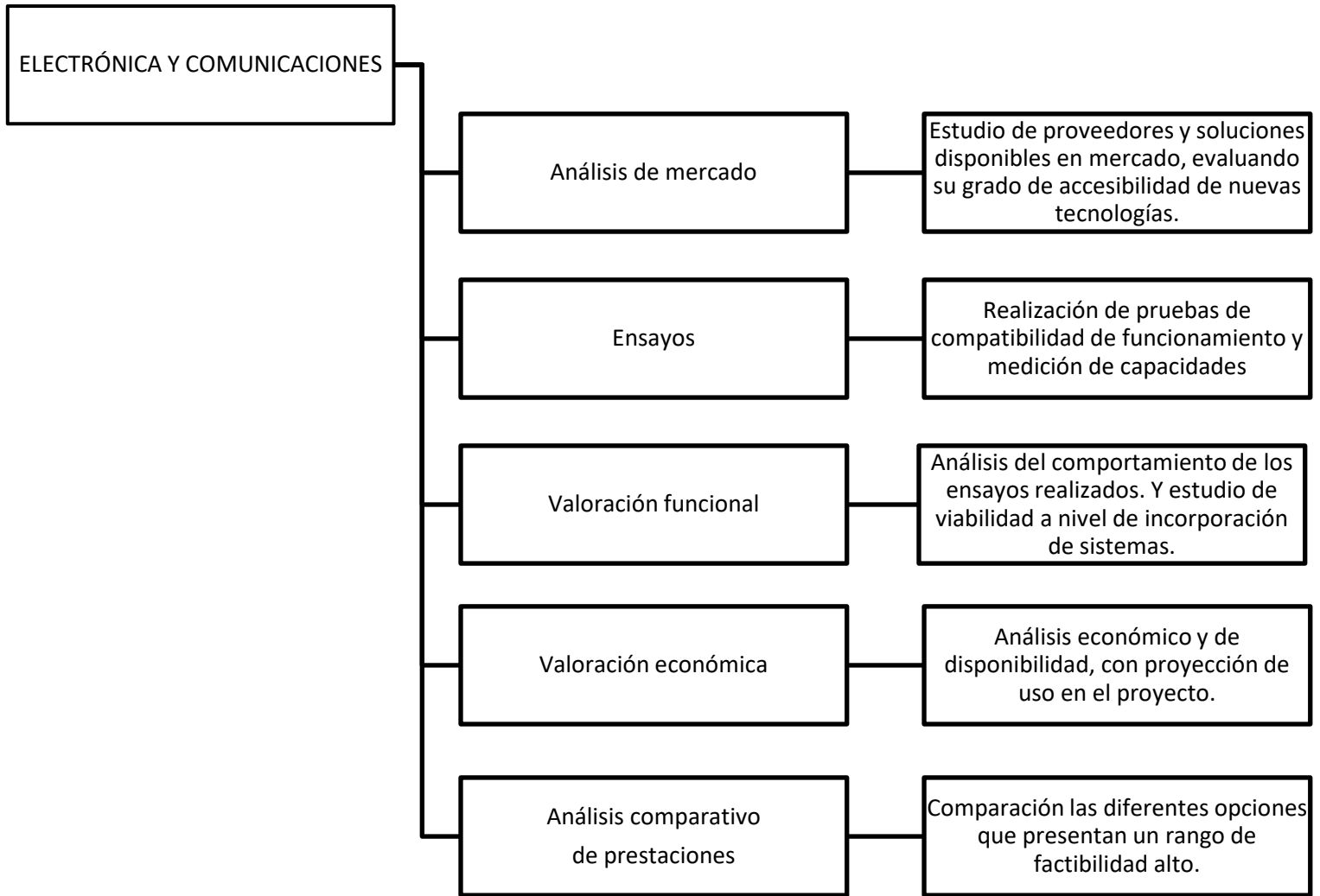


Figura 4.4 Diagrama funcional de Electrónica y Comunicaciones

- Paralelamente, el módulo de **Carga de Pago** se ha enfocado en la optimización de sistemas embarcados como cámaras, antenas y sensores, evaluando su capacidad para cumplir con las funciones específicas requeridas en los escenarios operativos. (Figura 4.5)

Para la **CARGA DE PAGO**:

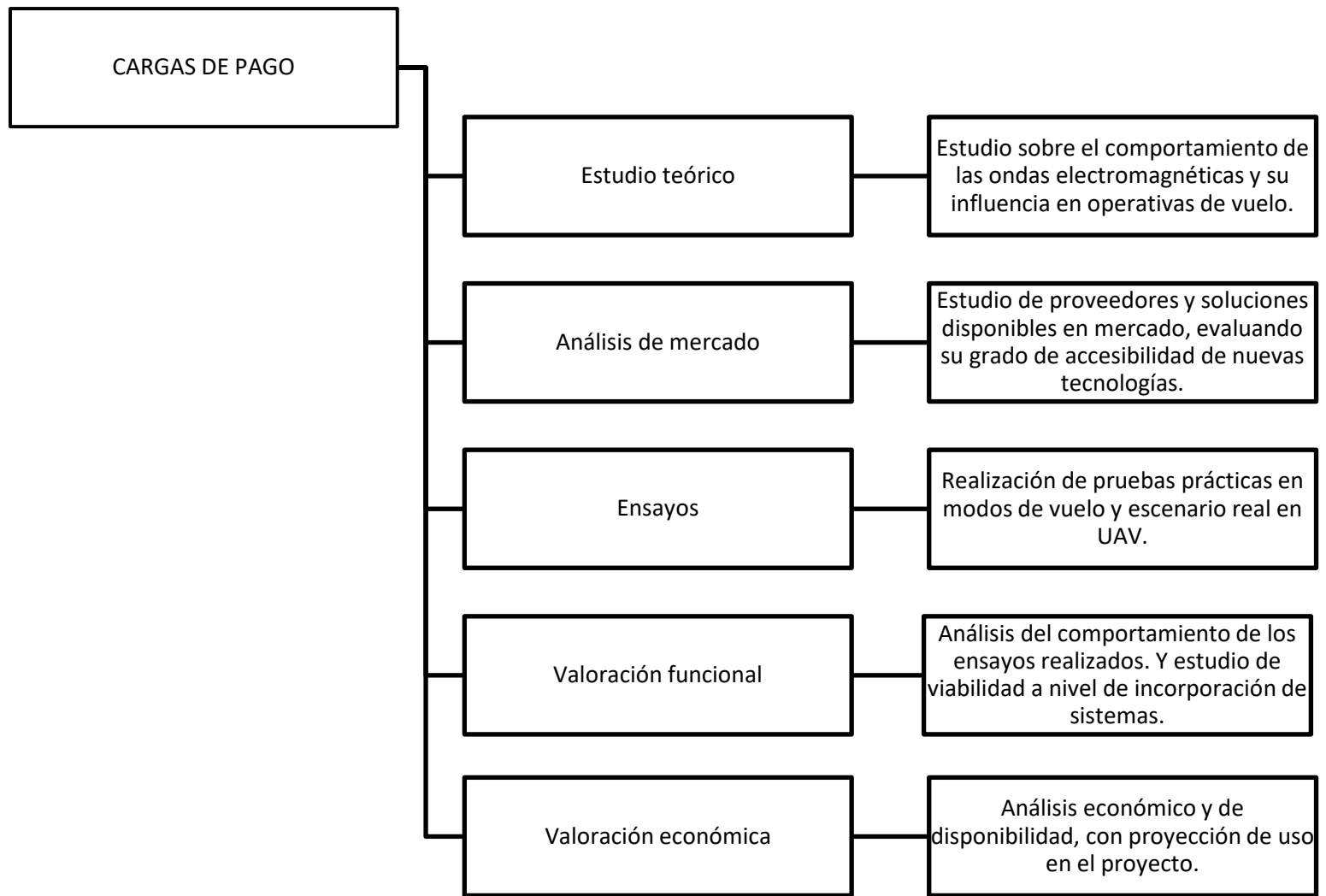


Figura 4.5 Diagrama funcional de Cargas de Pago

Cada uno de estos apartados del MPP responde a las necesidades concretas de los Casos de Uso definidos en el proyecto y la fase de Perfilado Final no solo consolida los avances alcanzados en las etapas anteriores, sino que también establece las bases para el desarrollo de un prototipo final robusto y eficiente. Esto permitirá que la solución UAV diseñada cumpla con las exigencias tecnológicas y operativas, adaptándose de manera óptima a las necesidades específicas de los diferentes escenarios operativos.

4.1. Apartado PLATAFORMA

La solución de UAV que se está estudiando se ha orientado hacia configuraciones de tipo cuadricóptero o hexacóptero, seleccionadas en función del peso máximo al despegue (MTOW) y de las demandas específicas de cada escenario operativo.

Estas configuraciones Multirrotor destacan por su flexibilidad y estabilidad, características que resultan esenciales en escenarios que requieren vuelos estacionarios precisos puesto que permiten una adaptabilidad significativa a los diferentes requisitos del proyecto. La modularidad de estos diseños facilita su ajuste a las exigencias específicas de cada caso de uso, optimizando la relación entre autonomía, alcance y capacidad de carga.

Por otro lado, se han evaluado y descartado configuraciones de ala fija y VTOL debido a limitaciones técnicas que podrían comprometer los indicadores clave de desempeño (KPIs) definidos en el proyecto. En particular, estas configuraciones presentan retos importantes en términos de maniobrabilidad, operación en espacios urbanos o restringidos, y eficiencia energética en vuelos estacionarios. Si bien estas alternativas son útiles para cubrir grandes superficies y distancias, su capacidad de carga útil es limitada, lo que las hace menos adecuadas para ciertos escenarios.

Como parte del proceso de selección, se han analizado múltiples candidatos a través del modelo de Predicción de Prestaciones (MPP). Esta herramienta ha permitido evaluar una amplia gama de UAVs considerando parámetros operativos clave, como autonomía, capacidad de carga, eficiencia energética y compatibilidad con tecnologías avanzadas de comunicación. Además, se busca un sistema eficiente que logre el menor consumo de potencia por unidad de masa elevada, obteniendo así una solución óptima que permita maximizar las capacidades operativas del dron en escenarios de alta demanda.

Cabe resaltar que aquellos UAV cuya configuración exceda un MTOW de 25 kg, según la normativa vigente deben cumplir con el requisito de obtener un certificado de aeronavegabilidad, para operar legalmente. Este requisito está establecido en el Reglamento (UE) n.º 748/2012 [1], que regula la certificación de aeronavegabilidad y medioambiental de las aeronaves y sus productos, componentes y equipos relacionados.

Además, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) especifica que las operaciones con UAS en la categoría "certificada" requieren la certificación del UAS por parte de EASA, la certificación del operador y, en su caso, la obtención de una licencia por parte del piloto a distancia. Este aspecto normativo garantiza que los equipos seleccionados cumplan con los estándares de seguridad operacional exigidos para escenarios críticos.

Por ello, los drones que no puedan satisfacer esta condición serán descartados, dado que los requisitos administrativos, legales y técnicos asociados implican largos tiempos de gestión y presentan barreras significativas para su operación en escenarios reales, comprometiendo la viabilidad del proyecto.

Los resultados obtenidos en las iteraciones del perfilado, junto con las pruebas experimentales en curso, están sentando las bases para seleccionar la solución final. Este enfoque asegura una optimización integral, equilibrando las prestaciones operativas, la eficiencia técnica y la viabilidad económica con los objetivos generales del proyecto.

La tabla (Figura 4.1.1) comparativa presenta un análisis detallado de diferentes drones evaluados en el proceso de perfilado, considerando tanto prototipos iniciales como aquellos candidatos para el desarrollo del prototipo final. Este análisis incluye múltiples parámetros clave para valorar el desempeño y la idoneidad de cada configuración. Entre los parámetros analizados se encuentra la clasificación de los sistemas en "abiertos" o "cerrados", lo cual representa su capacidad para ser modificados o integrar tecnologías adicionales, aunque este factor no es determinante por sí solo, sino un componente más del análisis global.

DRON	Sistema	Peso vacío (kg)	Peso batería (kg)	Carga útil (kg)	Peso Vuelo (kg)	Tiempo (min)	Potencia (W)	Eficiencia (W/Kg)
AT6	Abierto	3,50	1,96	1,50	6,96	20,00	1065,60	153,10
AT15	Abierto	6,00	3,92	6,00	15,92	20,00	2131,20	133,87
M350 L1	Cerrado	3,77	2,70	0,93	7,40	42,00	751,97	101,62
M350 MTOM	Cerrado	3,77	2,70	2,73	9,20	22,00	1435,58	156,04
Matrice 600 Vacío	Cerrado	5,52	4,08	0,00	9,60	40,00	1138,86	118,63
Matrice 600 MTOM	Cerrado	5,52	4,08	5,50	15,10	18,00	2530,80	167,60
AGRAS T10 Vacío	Cerrado	13,00	3,80	0,00	16,80	17,00	1736,82	103,38
AGRAS T10	Cerrado	13,00	3,80	4,40	21,20	9,00	3280,67	154,75
AGRAS T50 Vacío	Cerrado	39,90	12,10	0,00	52,00	16,00	5874,75	112,98
AGRAS T50	Cerrado	39,90	12,10	20,00	72,00	5,50	17090,18	237,36
Astro Vacío	Cerrado	3,095	2,07	0,00	5,17	37,00	509,29	98,60
Astro 1.5 Kg	Cerrado	3,095	2,07	1,50	6,67	25,00	753,75	113,09
Alta X Vacío	Abierto	10,86	8,94	0,00	19,80	50,00	1728,00	87,27
Alta X 10Kg	Abierto	10,86	8,94	9,98	29,78	22,00	3927,27	131,88

Figura 4.1.1 Tabla Comparativa de posibles Plataformas de Vuelo para la solución UAV

Los sistemas abiertos se destacan por su flexibilidad para incorporar componentes electrónicos avanzados, como módulos de comunicación o sensores específicos. Esta capacidad de personalización los hace especialmente útiles en escenarios que requieren soluciones tecnológicas específicas o alta interoperabilidad. Por otro lado, los sistemas cerrados, aunque menos adaptables, ofrecen ventajas en términos de estandarización y simplicidad, lo que los convierte en opciones adecuadas para operaciones con requerimientos técnicos bien definidos y con menor necesidad de personalización.

Esta falta de adaptabilidad representa un inconveniente significativo cuando se busca desarrollar una solución para diversos escenarios donde la integración de tecnologías específicas o ajustes a las necesidades del proyecto son cruciales. Además del tipo de sistema, la tabla incluye otras métricas operativas fundamentales.

En primer lugar, se evalúa el peso inicial y la capacidad básica de los drones, lo cual es crucial para determinar su maniobrabilidad y su peso máximo al despegue (MTOW). También se analiza la autonomía y capacidad operativa, reflejando el tiempo de operación y el alcance efectivo de cada configuración, factores clave para aplicaciones que requieren vuelos prolongados, como inspecciones o generación de mapas de cobertura. Otro parámetro relevante es el consumo energético, evaluado en relación con el rendimiento operativo. Los drones con un menor consumo por unidad de carga o tiempo operativo son priorizados por su eficiencia. Finalmente, se evalúa el rendimiento global de cada configuración, sintetizado en una métrica visual mediante un sistema de codificación por colores. Los valores en verde indican un desempeño sobresaliente, mientras que los colores amarillo y rojo destacan áreas con margen de mejora o configuraciones menos favorables.

Estas plataformas permiten la incorporación de componentes personalizados sin necesidad de realizar modificaciones estructurales significativas, facilitando el diseño modular. Esto es especialmente valioso en el diseño específico de soluciones UAV con requerimientos variables, como la incorporación de nuevos módulos de comunicación, sistemas de procesamiento avanzado o sensores específicos para escenarios diversos.

Una de las mayores ventajas de optar por una plataforma de sistema abierto es la reducción de tiempos en cuanto a ensayos y calibración intensiva en las fases iniciales del diseño. Una plataforma de vuelo abierta permite realizar iteraciones rápidas ya que las configuraciones pueden adaptarse dinámicamente a medida que se obtienen datos de rendimiento. Esto no solo optimiza el proceso de validación, sino que también permite detectar y resolver problemas de compatibilidad o rendimiento en etapas tempranas del desarrollo. Además, las pruebas pueden personalizarse para abordar los riesgos específicos asociados a los escenarios de operación previstos, incrementando la confiabilidad de los resultados.

Por otro lado, se presentan desafíos inherentes que deben considerarse cuidadosamente durante el proceso de selección y diseño. Como es la integración de módulos tecnológicos propios, que a menudo requieren adaptaciones específicas tanto en hardware (detallado en el apartado de *CARGA DE PAGO*) como en software para garantizar un funcionamiento óptimo. Asimismo, la puesta en marcha de los sistemas de comunicación entre los sistemas embarcados y la estación de tierra puede resultar compleja, ya que implica la configuración de protocolos de transmisión de datos, la sincronización en tiempo real y la implementación de medidas de seguridad para proteger la información transmitida.

Adicionalmente, las plataformas abiertas demandan un diseño específico de anclajes y estructuras de soporte para los componentes integrados, con el fin de asegurar estabilidad mecánica, reducir vibraciones y cumplir con los requisitos de peso y balance del UAV. Estos aspectos, aunque demandantes, son esenciales para maximizar el rendimiento del sistema y garantizar una operación segura y eficiente.

Dentro de la lista de plataformas de vuelo evaluadas, el equipo Alta X presenta una serie de características que lo hacen especialmente interesante como candidato a plataforma de vuelo de la solución UAV final. Su diseño modular y adaptable permite la integración de componentes avanzados sin necesidad de modificaciones estructurales significativas. Destaca por su capacidad para soportar cargas útiles variables, lo que lo convierte en una opción versátil para múltiples escenarios operativos. Su sistema de propulsión eficiente y su autonomía ampliada son ideales para aplicaciones que

requieren vuelos prolongados, mientras que su arquitectura abierta facilita la implementación de sistemas de control avanzados y el despliegue de tecnologías específicas.



Figura 4.1.2 Ejemplo de Plataforma de vuelo analizada: Alta X.

En cualquier caso, la selección de equipos que presentan características y diseño alineados con las necesidades del proyecto, su factibilidad como solución UAV final debe seguir en estudio, presente en el flujo iterativo de diseño hacia el prototipo final y, además, debe de ser validada mediante un riguroso programa de pruebas y ensayos. Si bien sus especificaciones iniciales pueden indicar un alto potencial para cumplir con los requisitos operativos, es fundamental verificar su desempeño en diversos escenarios y bajo las condiciones específicas de los casos de uso planteados. Aspectos como la estabilidad de la plataforma, la interoperabilidad con los módulos tecnológicos embarcados y el cumplimiento de los estándares de comunicación deben evaluarse en profundidad. Además, será necesario analizar su comportamiento en situaciones críticas, como vuelos prolongados u operaciones en entornos con restricciones de cobertura y altos niveles de interferencia.

4.2. Apartado PROPULSIÓN

4.2.1. Pruebas y Ensayos

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados en el marco del desarrollo del proyecto. Tras un análisis de las combinaciones motor-hélice detalladas en el entregable *6G_SORUS_DRONES_A2.1_E2_Perfilado_Intermedio*, se ha identificado que algunas de estas configuraciones podrían haber sido sobredimensionadas. Este sobredimensionamiento habría resultado en un diseño que excede los requerimientos reales de ciertos escenarios operativos, impactando negativamente en factores como la eficiencia energética y el peso del sistema.

Las nuevas combinaciones Motor-Batería-Hélice ensayadas se recogen en la siguiente tabla:

Motor	Voltaje	Hélice
MN705S 260KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	TMotor 26*8,5R
MN705S 260KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	Gemfam 26*8,5R
MN705S 260KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	MF 26*14R Pleg. X Carbon
MN701S 280KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	TMotor 24*7,2R
MN701S 280KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	Gemfam 24*7,5R
MN701S 280KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	MF 24*12R Pleg. X Carbon
MN605S 320KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	TMotor 22*6,6R
MN605S 320KV	25V LiPo 6S / Pb 12Celdas	MF 22*11R Pleg. X Carbon

Los resultados de ensayos realizados de los que se dispone en el momento de redacción de este documento se han añadido a la base de datos: **MPP_V2.xlsx**

Para ampliar la base de datos sobre el rendimiento de diferentes combinaciones y validar la confiabilidad de los datos proporcionados por los fabricantes, se ha implementado un proceso continuo de comparación entre los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio y los datos declarados por los fabricantes. Este análisis permite identificar posibles divergencias significativas y evaluar la fiabilidad de los datos del fabricante. A medida que se generan nuevos resultados experimentales, se procede a realizar un análisis detallado, que, de ser concluyente, conducirá al establecimiento de un coeficiente de corrección. Este coeficiente ajustará los datos del fabricante para que se alineen más estrechamente con las condiciones reales de operación, proporcionando así un marco más robusto para la evaluación de componentes y cubriendo escenarios en los que los ensayos directos no sean viables.

A continuación, se muestra una comparación de los resultados de los ensayos realizados por el fabricante y los obtenidos en laboratorio.

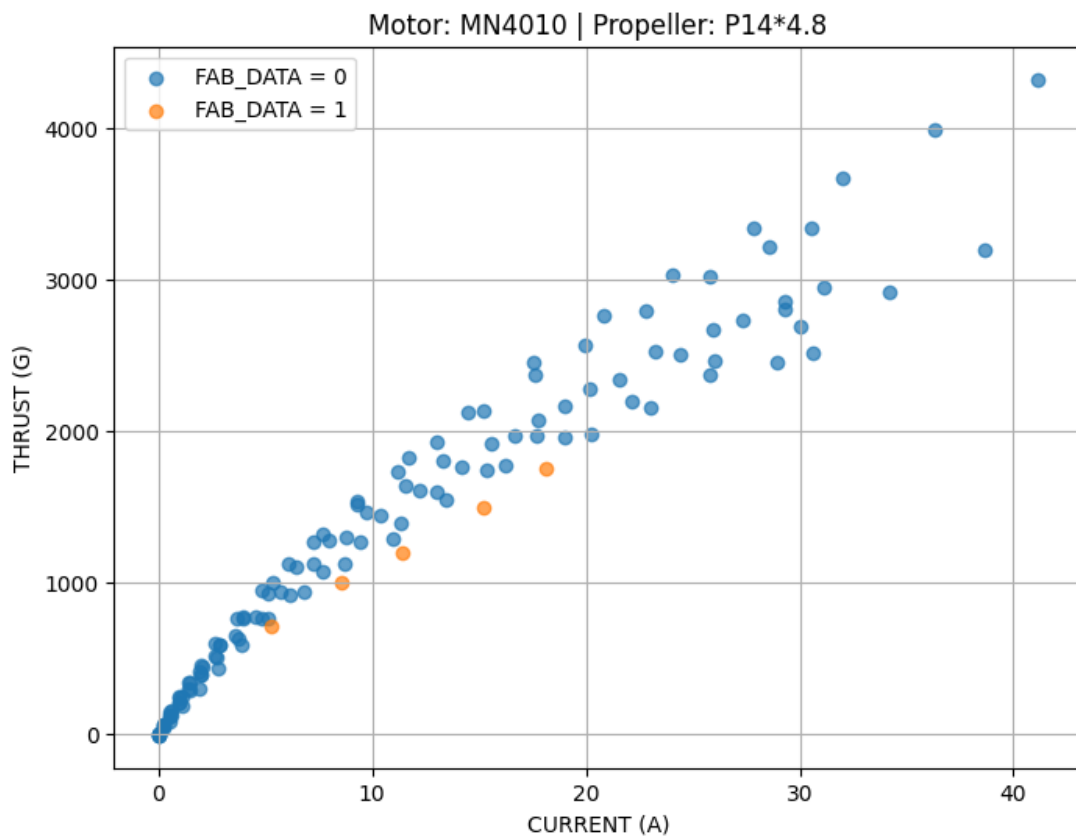
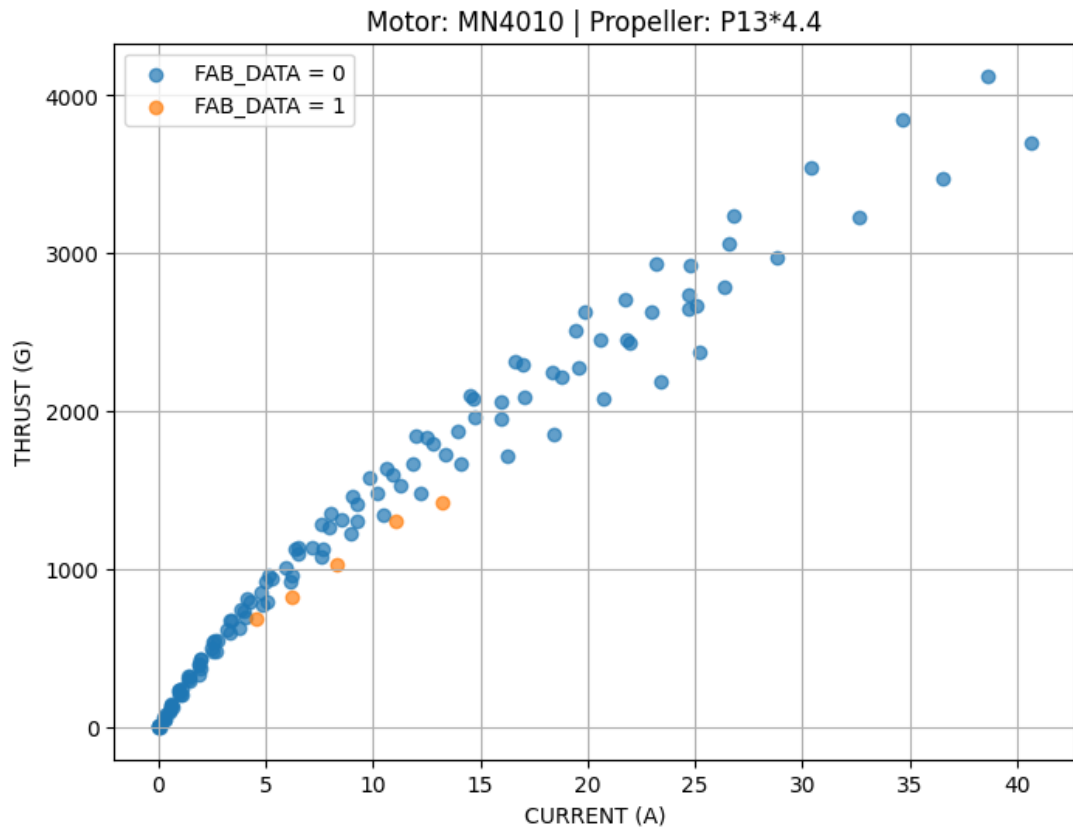
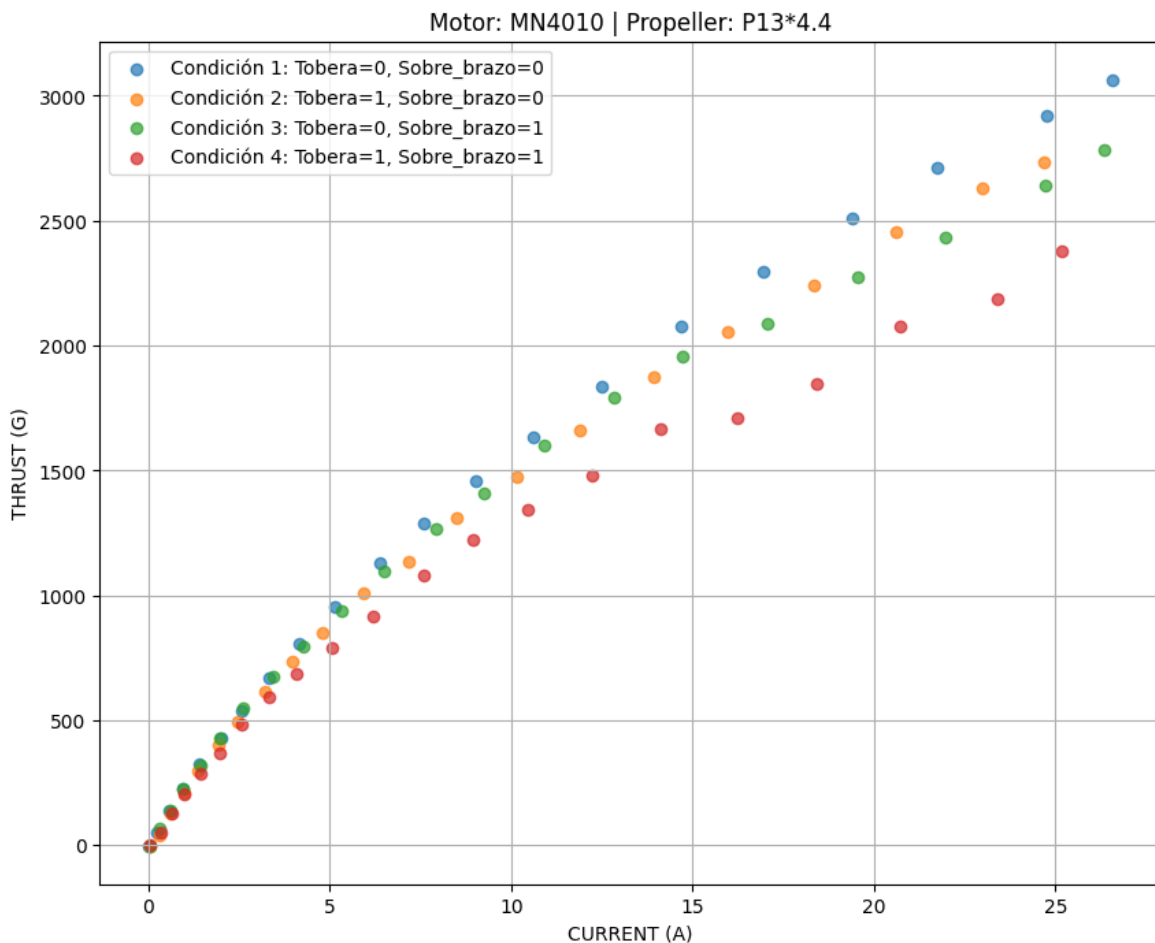


Figura 4.2.1 Ensayos Motor MN4010 con Hélice P13*4,4 y P14*4.8 Datos fabricante (1) Datos propios (0)

En la Figura 4.2.1 se muestran los ensayos tanto del fabricante (FAB_DATA = 1) como los obtenidos en laboratorio propio (FAB_DATA = 0) del motor **T-MOTOR MN4010**, con las hélices **T-MOTOR P13*4.4** y **P14*4.8**. En los datos obtenidos, donde se grafica la relación empuje (Thrust) con el consumo de corriente, se muestran múltiples curvas de comportamiento debido a las distintas configuraciones evaluadas: pruebas con y sin tobera, con el motor montado sobre el brazo del dron o bajo el mismo, entre otros escenarios.

Estas combinaciones evaluadas indican que, bajo las mismas condiciones de consumo de corriente, la capacidad de generación de empuje (medida en gramos) es superior en los ensayos realizados en condiciones controladas de laboratorio, en comparación con los resultados proporcionados por el fabricante, indicando que los datos del fabricante tienen una tendencia a ser más conservadores.

Estos ensayos también evidencian cómo la posición del motor dentro del conjunto propulsor influye significativamente en el rendimiento general del conjunto de propulsión. Se observa que la posición del motor ya sea dispuesto por debajo o por encima del brazo del dron, genera diferencias en el empuje y, asimismo, la presencia o ausencia de elementos adicionales como toberas afecta directamente el flujo de aire generado por las hélices, modificando las características de propulsión. Estas variaciones subrayan la necesidad de optimizar la configuración del sistema propulsivo en función de las demandas específicas de cada escenario operativo, permitiendo alcanzar un equilibrio adecuado entre desempeño y eficiencia. (Figura 4.2.2)



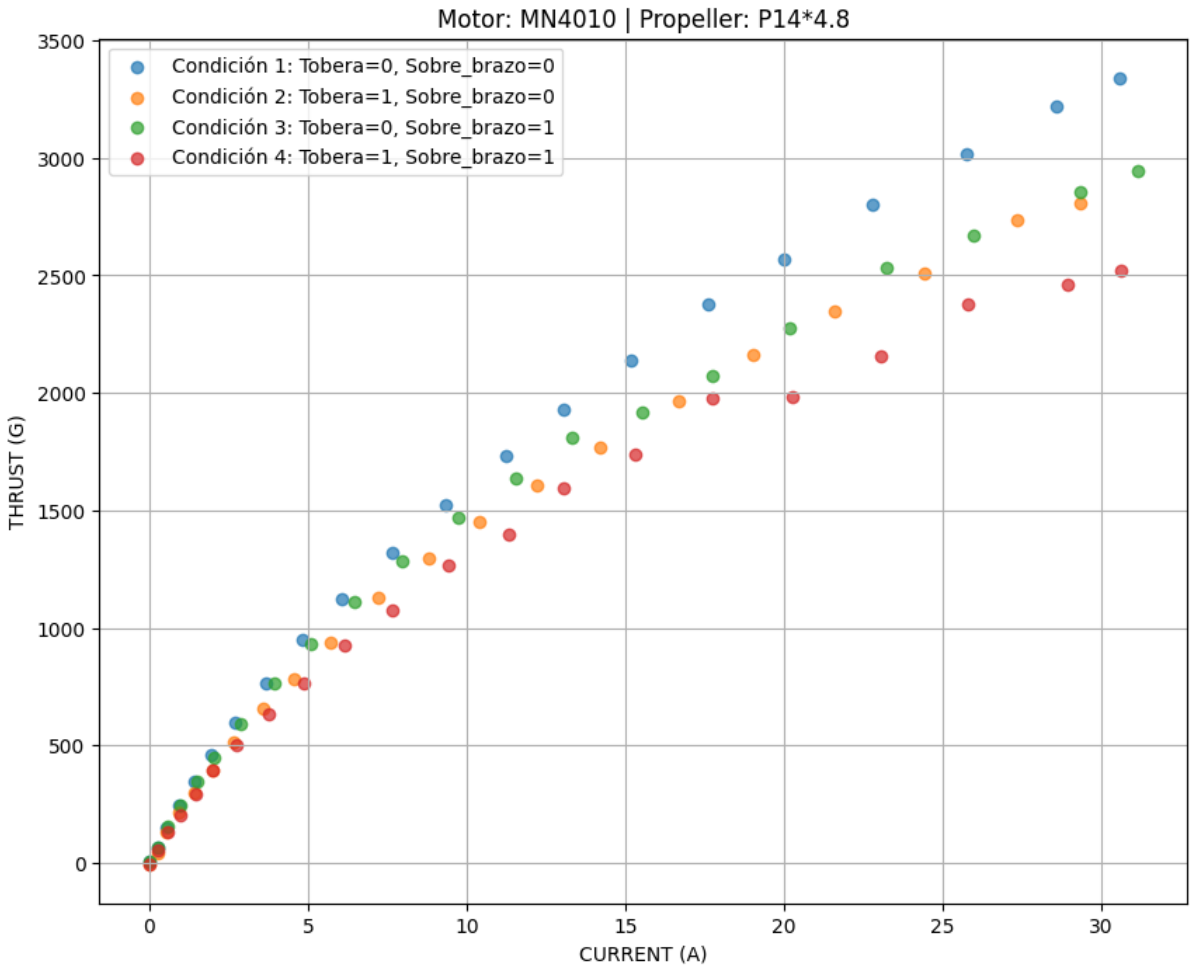


Figura 4.2.2 Detalle diferencias de ensayos Motor MN4010 con Hélice P13*4,4 y P14*4.8

La gráfica (Figura 4.2.3) también muestra cómo el empuje (Thrust (g)) generado por el motor **MN701-S** y la hélice **T-MOTOR P24*7.2** varía con respecto a la corriente consumida (Current (a)), diferenciando entre dos fuentes de datos: los proporcionados por el fabricante (FAB_DATA = 1) y los obtenidos experimentalmente en el laboratorio (FAB_DATA = 0). Ambas tendencias son similares en términos generales, indicando una relación positiva entre la corriente y el empuje: a mayor corriente, mayor empuje.

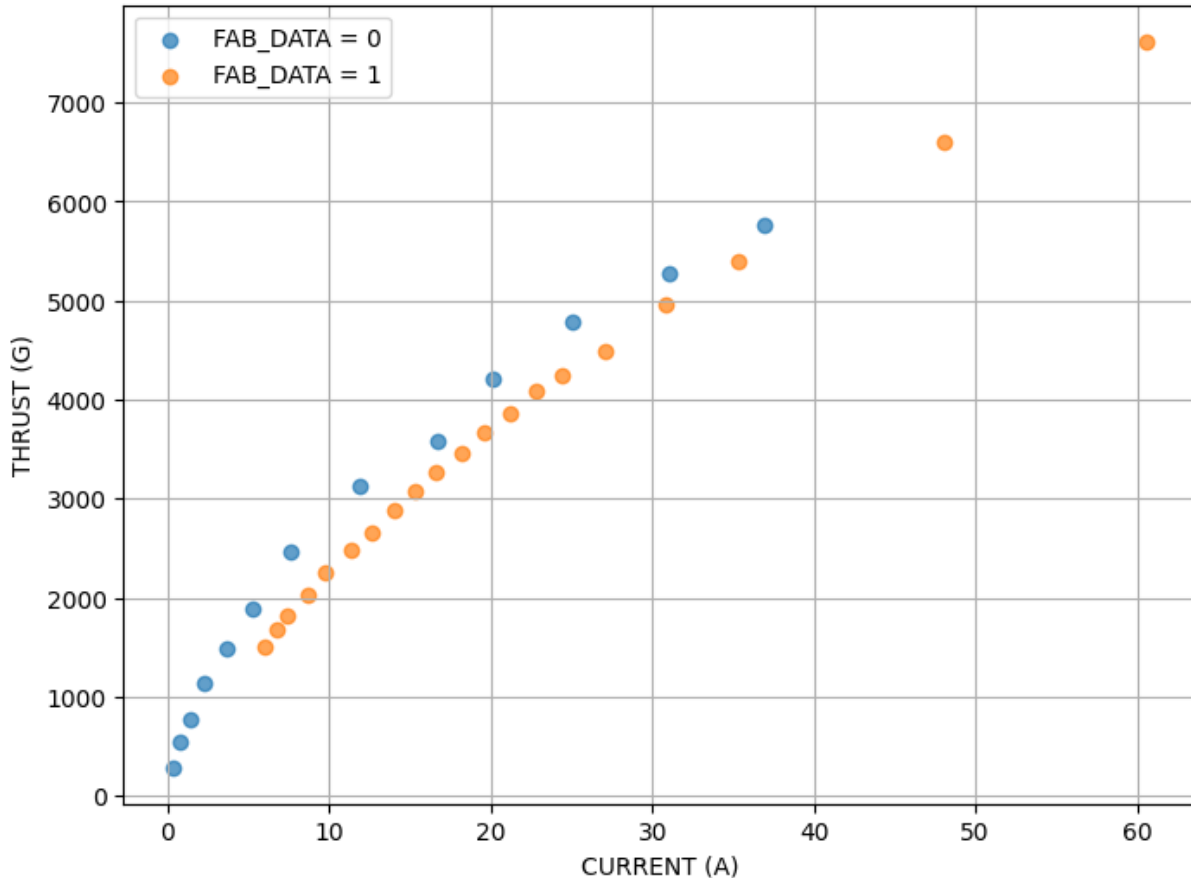


Figura 4.2.3 Comparación MN701S – P24*7.2 Datos fabricante (1) Datos propios (0)

A mismo consumo de corriente, los datos del fabricante tienden a mostrar un menor empuje que los datos de laboratorio propio. No obstante, en corrientes inferiores a 35A, se puede observar que los datos del fabricante tienen una tendencia lineal. A partir de aproximadamente los 40A, ambas curvas de empuje se cruzan, lo que indica que, en este rango de consumo, los datos del fabricante comienzan a superar al empuje registrado en los ensayos de laboratorio.

Por otro lado, la linealidad observada en las corrientes inferiores a 35A en los datos del fabricante podría deberse a un enfoque conservador en la caracterización, evitando variaciones que podrían no representar un uso real típico. En cambio, los datos de laboratorio propio muestran una mayor dispersión, reflejando un comportamiento más realista.

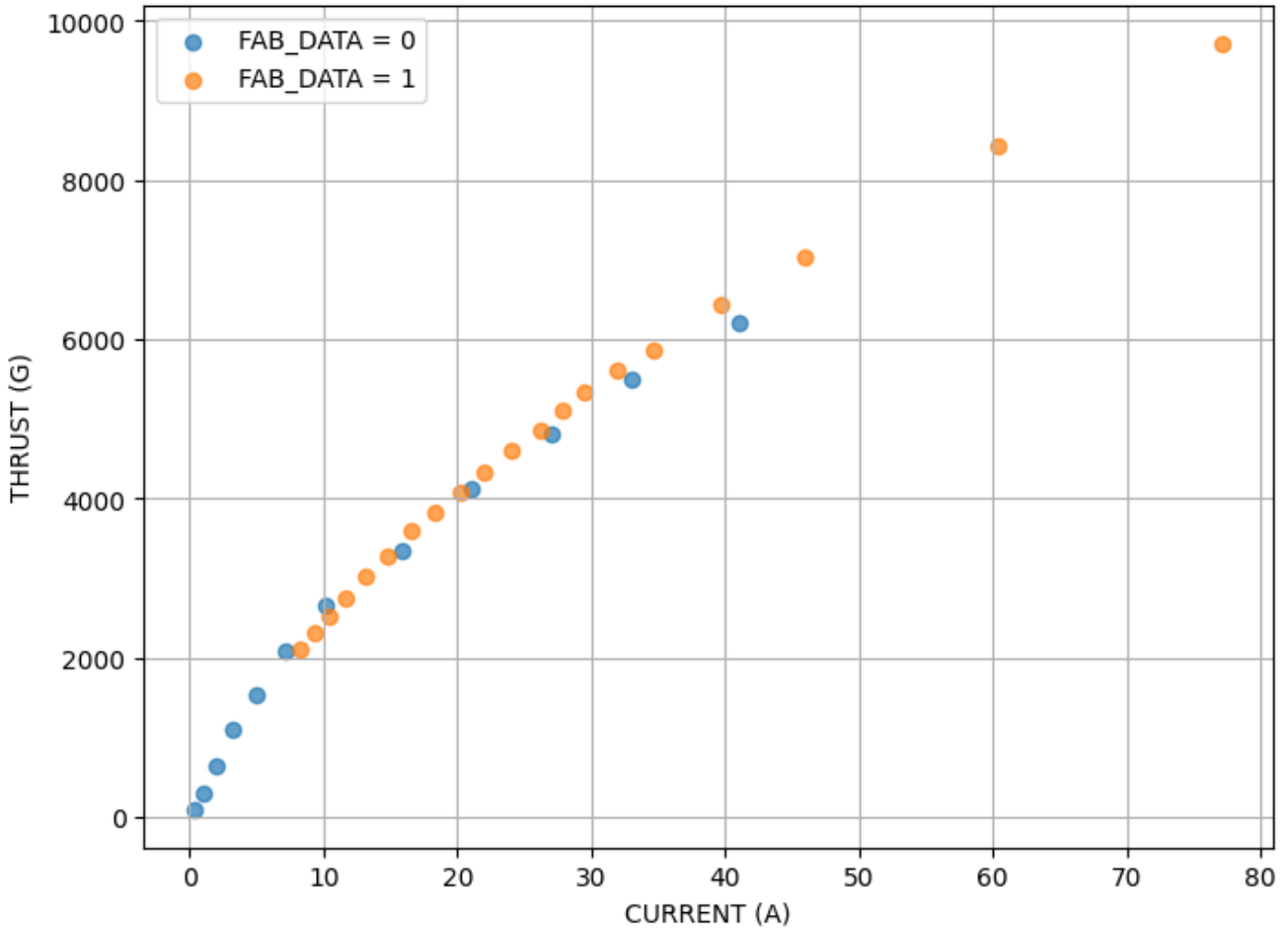


Figura 4.2.4 Comparación MN705S – G26*8.5 Datos Fabricante (1) Datos Ensayos propios (0)

En comparación con la gráfica anterior, pero representando el conjunto: motor **MN705-S** y la hélice **T-Motor G26*8.5** (Figura 4.2.4), se observa que se sigue una tendencia similar a la anterior, pero introduce variaciones relevantes para su análisis comparativo.

En esta gráfica, los datos son consistentes en corrientes bajas y medias (0–30 A), con ambos conjuntos (FAB_DATA = 0 y FAB_DATA = 1) mostrando una alineación razonable. Sin embargo, a partir de los 40 A, se aprecia un comportamiento más divergente, donde los datos del fabricante tienden nuevamente a sobreestimar el empuje. Esto es particularmente evidente en valores de corriente superiores a 50 A, donde el empuje reportado por el fabricante excede los valores experimentales.

En comparación con la gráfica anterior, se observa una dispersión ligeramente menor en los datos del fabricante para este motor y hélice específicos. Aun así, el patrón general se mantiene: los valores experimentales (FAB_DATA = 0) son más conservadores, especialmente en corrientes altas. Este patrón sugiere que las condiciones ideales utilizadas por el fabricante para obtener los datos no reflejan completamente las condiciones reales en el laboratorio, debido a factores como la disipación térmica o las características específicas del banco de pruebas.

Aunque los datos proporcionados por los fabricantes son útiles como referencia inicial, las diferencias observadas en las gráficas previas destacan la necesidad de implementar un factor de corrección. Este ajuste es esencial para alinear los datos teóricos con los resultados experimentales, lo que garantiza

una mayor precisión en el modelado del rendimiento real del sistema. Si bien algunos ensayos han mostrado coincidencia con los valores del fabricante, se ha constatado que las variaciones no son exclusivas de un motor o hélice en particular, sino un comportamiento recurrente en distintas configuraciones. El propósito final es definir un factor de corrección que permita estimar las prestaciones del UAV con la mayor exactitud posible respecto a su desempeño en un entorno operativo real.

Para obtener dicho factor de corrección, se están evaluando diferentes técnicas que van a permitir comparar y deducir cuál se adapta mejor a los resultados esperados. A continuación, se hace una explicación de los métodos estudiados y en el archivo ***MPP_Factor_de_Correccion.ipynb*** se puede visualizar el código, análisis de datos y estudio realizado.

Este archivo con extensión .ipynb puede abrirse utilizando Google Colab, una plataforma en línea que no requiere instalación de software adicional. Para ello, basta con acceder a la página de Google Colab, iniciar sesión con una cuenta de Google y cargar el archivo directamente desde el almacenamiento local. Esta alternativa resulta conveniente para usuarios que no desean configurar entornos locales.

Otra opción consiste en abrir el archivo localmente mediante Jupyter Notebook, una herramienta que permite combinar código, texto y visualizaciones en un entorno interactivo. En este caso, es necesario contar con Python instalado en el sistema. Si no está disponible, se puede descargar desde su sitio oficial. Una vez instalado, Jupyter Notebook puede habilitarse ejecutando el comando `pip install notebook` en la terminal. Para abrir el archivo, se debe navegar al directorio donde se encuentra y ejecutar `jupyter notebook`. Esto iniciará un servidor que generará una interfaz en el navegador web, desde donde será posible seleccionar el archivo .ipynb y trabajar en él de manera interactiva.

Adicionalmente, pueden abrirse utilizando entornos de desarrollo como Visual Studio Code (VSC). Para ello, es necesario instalar la extensión de Python disponible en VSC, que incluye soporte para trabajar con Jupyter Notebooks. Una vez configurada la extensión, simplemente se abre el archivo directamente desde el explorador de archivos de VSC, lo que permitirá visualizar y ejecutar el contenido del cuaderno en un entorno integrado con herramientas avanzadas de edición y depuración. Esta opción combina flexibilidad y eficiencia en el desarrollo local.

4.2.2. Ajuste por interpolación

Hay muchos tipos de interpolación, la interpolación lineal es una de las técnicas más básicas para estimar valores intermedios. Su enfoque se basa en conectar dos puntos consecutivos con una línea recta y utilizar la pendiente entre ellos para calcular un valor intermedio. En el contexto de los datos de propulsión, al disponer de dos puntos experimentales que relacionan la corriente (CURRENT) con el empuje (THRUST), este método es ideal para predecir el empuje en un valor de corriente intermedia. Aunque su simplicidad es una ventaja, esta técnica es inadecuada si la relación entre las variables no es lineal, ya que no captura comportamientos más complejos.

Por otro lado, la interpolación polinómica utiliza polinomios de grado n que pasan exactamente por $n+1$ puntos de datos. Este enfoque es más adecuado puesto que la relación entre la corriente y el empuje es no lineal y existen suficientes puntos experimentales que respalden esta complejidad.

Este método puede modelar mejor las tendencias no lineales observadas en los datos de propulsión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los polinomios de alto grado pueden generar oscilaciones indeseadas, especialmente en los extremos del rango de datos.

Por otro lado, **la interpolación por splines** supera algunas de las limitaciones de los polinomios de alto grado al dividir el rango de datos en segmentos más pequeños y ajustar un polinomio de bajo grado, generalmente cúbico, en cada uno de ellos. Este método garantiza transiciones suaves entre segmentos, siendo especialmente útil para estimar valores en datos de propulsión que presentan variaciones locales.

Otra técnica relevante es la interpolación por regresión, que no busca pasar exactamente por los puntos de datos, sino ajustar una curva que minimice el error general. Esto la convierte en una herramienta útil cuando los datos experimentales tienen ruido o variabilidad. En el caso de los datos de propulsión, este método ayuda a identificar una relación funcional más robusta entre la corriente y el empuje.

En la Figura 4.2.5 y Figura 4.2.6, se puede observar la gráfica que representa la interpolación para el conjunto MN701-S / P24*7.2, donde se ha identificado que presenta limitaciones importantes, ya que introduce deformaciones significativas en los datos. Estas deformaciones se manifiestan como desviaciones que no siguen la tendencia natural de los datos originales, lo cual compromete la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante este enfoque.

La principal causa de esta deformación radica en la naturaleza del método de interpolación empleado, que fuerza un ajuste matemático a través de los puntos de datos sin considerar las características subyacentes de la relación física entre las variables. En este caso, la relación entre la corriente eléctrica (CURRENT (A)) y el empuje (THRUST (G)) puede no ser adecuadamente representada por el modelo polinómico o spline seleccionado. Esto es especialmente problemático cuando los datos experimentales tienen un comportamiento no lineal complejo o incluyen irregularidades debido a la variabilidad inherente en el sistema de propulsión.

Además, al observar los resultados interpolados, es evidente que la técnica utilizada no logra capturar con precisión los cambios graduales o las transiciones que ocurren en los datos originales.

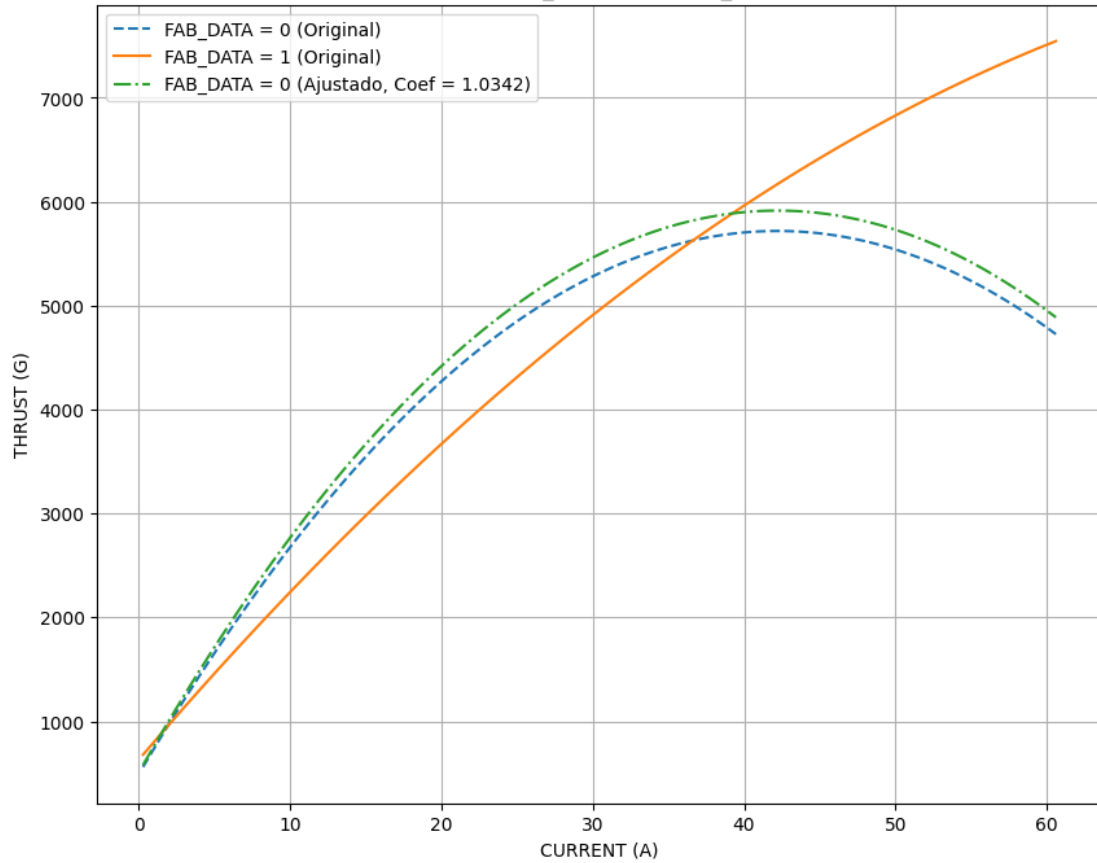


Figura 4.2.5 Ejemplo interpolación polinómica

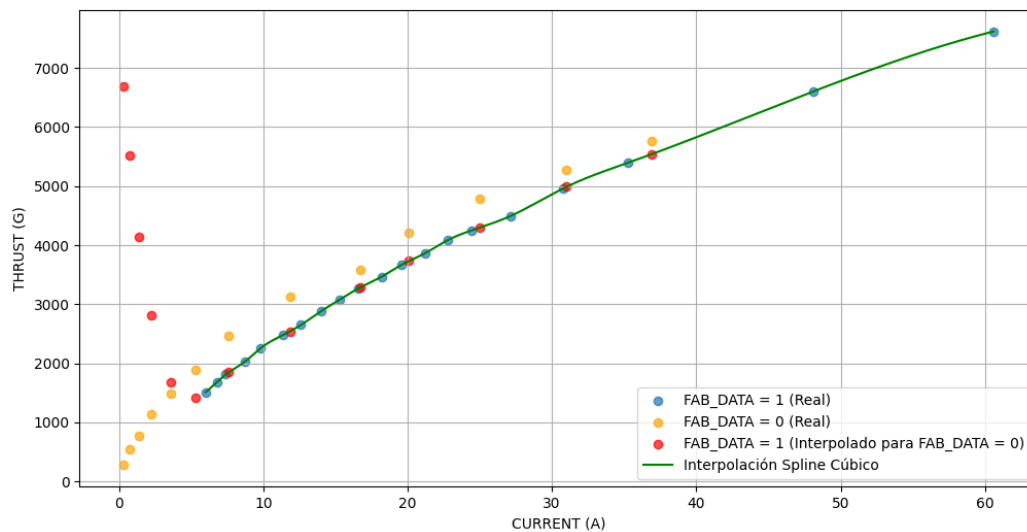


Figura 4.2.6 Ejemplo interpolación Spline

4.2.3. Ajuste por modelos no lineales (Corrección Polinómica)

Otra de las formas para determinar el factor de corrección que ajusta los datos del fabricante y los resultados experimentales en modelos no lineales, es el un enfoque basado en corrección polinómica.

Este método se aplica cuando las relaciones entre las variables principales, como corriente consumida, empuje generado y eficiencia, no son lineales y presentan diferencias debido a las condiciones de diseño o las pruebas experimentales.

El proceso comienza con la recolección de datos tanto experimentales como del fabricante, asegurándose de que ambos conjuntos correspondan a las mismas configuraciones de motores, hélices y condiciones operativas. Estos datos se normalizan para unificar las unidades y escalas, facilitando su comparación y evitando sesgos derivados de diferencias en las condiciones de medición.

A continuación, se ajusta un modelo polinómico a los datos experimentales. Este modelo se elige porque permite capturar comportamientos no lineales al incluir términos de mayor grado, como cuadrados o cúbicos, que reflejan con precisión las tendencias observadas en los datos. Los coeficientes del polinomio se determinan mediante técnicas de ajuste, como mínimos cuadrados, para minimizar las diferencias entre los datos experimentales y los valores proporcionados por el modelo corregido.

Una vez definido el modelo polinómico, el factor de corrección se calcula evaluando las diferencias entre los datos experimentales y los del fabricante en función de las mismas entradas. Este factor se incorpora al modelo del fabricante como un ajuste adicional, modificando sus resultados para que coincidan más estrechamente con las observaciones reales.

Por último, el modelo corregido se valida utilizando datos adicionales no empleados en el ajuste inicial, asegurando que el factor de corrección sea aplicable a una variedad de configuraciones. Este enfoque permite que las predicciones del sistema sean más precisas, reflejando mejor el rendimiento real observado y minimizando las discrepancias entre los modelos y los datos empíricos.

Aplicando esto al conjunto de estudio, se obtiene lo observable en la Figura 4.2.7: para el caso de $FAB_DATA = 0$, representado por los puntos y la curva azul, el modelo ajustado captura bien la tendencia general, especialmente en valores intermedios y altos de corriente (CURRENT (A)). Sin embargo, en el rango inicial (valores bajos de corriente), se observa una ligera desviación entre los datos experimentales y la curva ajustada. Esto podría indicar que un modelo cuadrático no es completamente adecuado para describir la relación entre la corriente y el empuje (THRUST (G)) en esa región.

En cuanto a $FAB_DATA = 1$, los puntos y la curva naranja muestran un comportamiento más uniforme, con la curva ajustada reproduciendo de manera más precisa la tendencia de los datos experimentales a lo largo de todo el rango de corriente. Esto sugiere que los datos correspondientes a $FAB_DATA = 1$ son más compatibles con el modelo cuadrático, debido a su distribución más regular o menor variabilidad.

Las dos curvas obtenidas permiten predecir y obtener puntos concretos dentro de la función generada por los puntos medidos previamente, no obstante, necesitan de un ajuste adicional para poder extrapolar los datos del fabricante a datos semejantes a los encontrados en un entorno real.

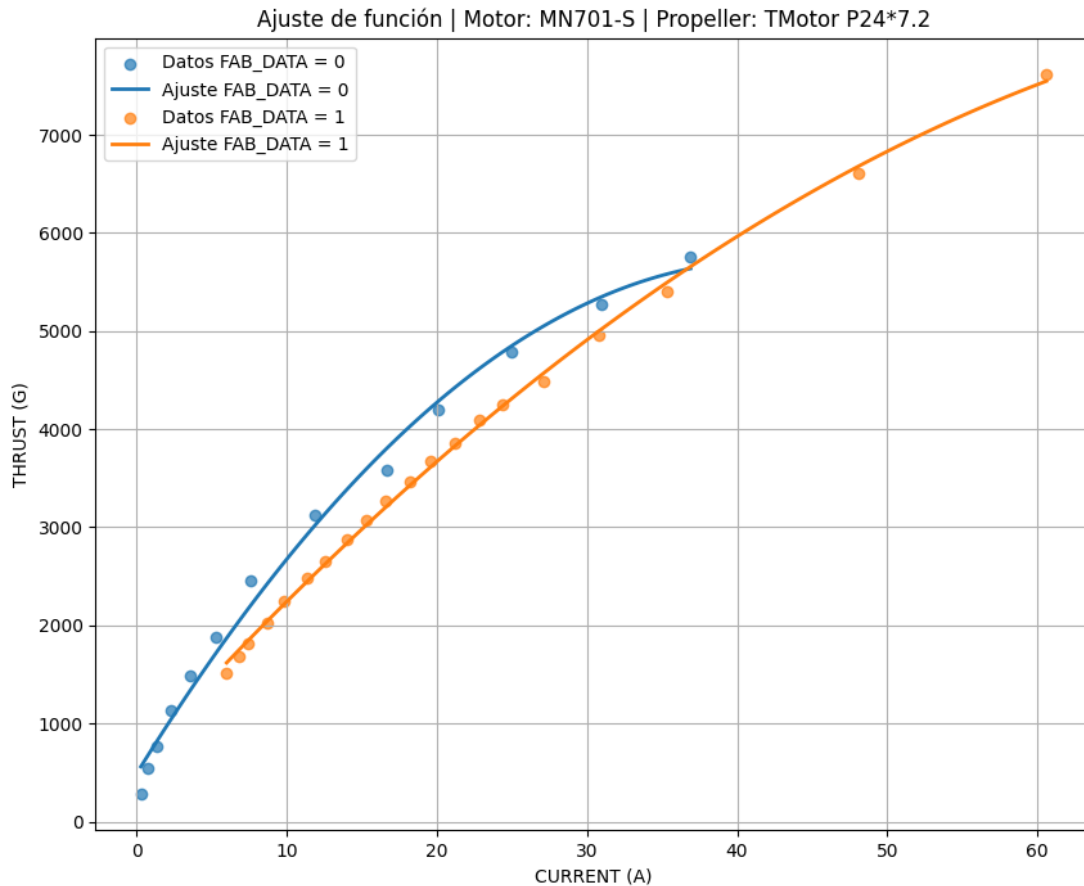


Figura 4.2.7 Ajuste por Modelo de Regresión Polinómica

4.2.4. Ajuste por optimización (Error Cuadrático Medio)

La técnica de optimización mediante minimización del error cuadrático medio (ECM) es ampliamente utilizada en problemas de ajuste y calibración de modelos. Su objetivo principal es encontrar un conjunto de parámetros que minimicen la diferencia entre los valores predichos por un modelo y los datos observados. Este enfoque es especialmente útil cuando se busca ajustar un conjunto de datos a otro mediante transformaciones simples, como escalado o traslación.

El Error Cuadrático Medio (ECM) es una medida estadística que cuantifica el promedio del cuadrado de las diferencias entre los valores estimados y los valores reales. Matemáticamente, para un conjunto de datos, se define como:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{pred} - y_{obs})^2$$

El ajuste se realiza aplicando un coeficiente de transformación a un conjunto de datos inicial (FAB_DATA=1) para que se asemeje lo más posible a otro conjunto de referencia (FAB_DATA=0). Esto implica que el coeficiente óptimo debe minimizar el ECM entre las curvas resultantes de ambos conjuntos.

Una vez que se determina el coeficiente óptimo, se aplica al conjunto transformado, lo que permite evaluar visual y cuantitativamente el grado de alineamiento con el conjunto de referencia. La efectividad del ajuste puede ser analizada graficando las curvas antes y después de la transformación, así como

comparando el valor del ECM final.

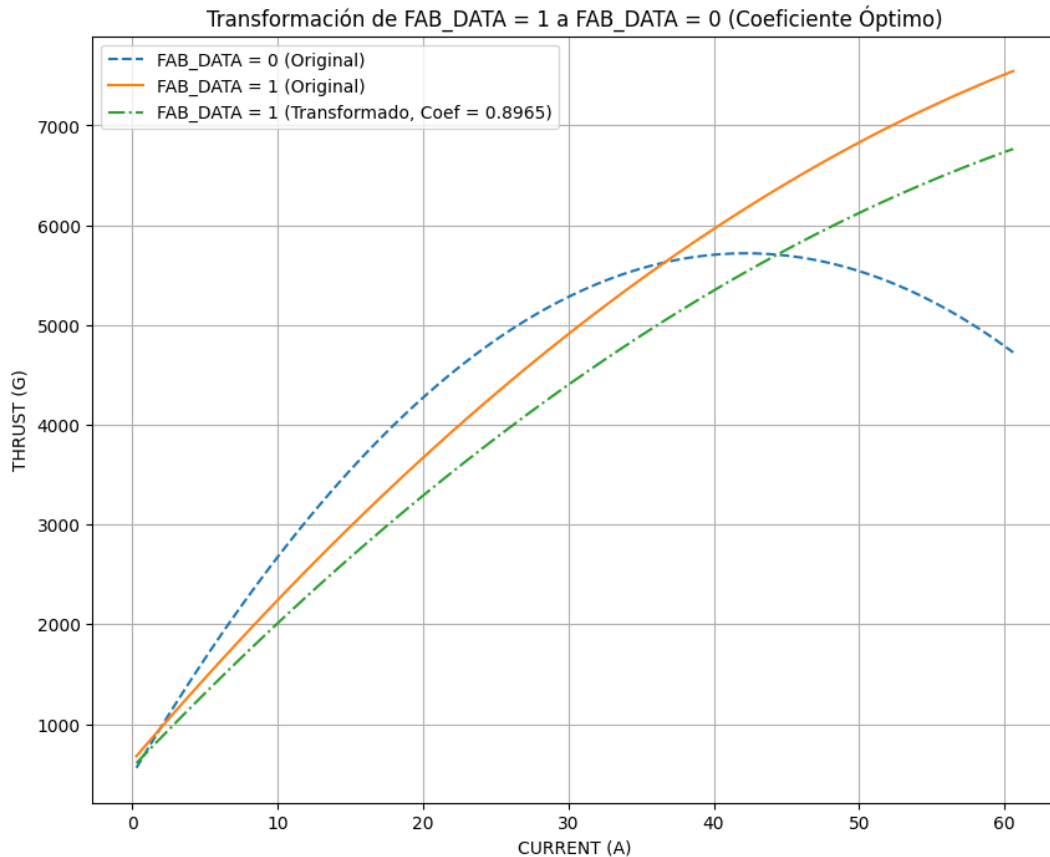


Figura 4.2.8 Ajuste por Error Cuadrático

En la Figura 4.2.8 se puede observar cómo al calcular el coeficiente óptimo, se obtiene una curva transformada que va adoptando la tendencia deseada, no obstante, esta se ve perjudicada por la campana generada por los datos predichos en valores de corrientes consumidas más elevadas, obteniendo así una curva transformada inferior a la esperada.

Este método sirve como punto de referencia para cuantificar el coeficiente que se explica a continuación.

4.2.5. Ajuste proporcional simple (Método Iterativo)

La relación proporcional simple consiste en aplicar un coeficiente constante que escala todos los valores de FAB_DATA = 1 para asemejarlos a los de FAB_DATA = 0. Este coeficiente se calcula para minimizar una métrica global, como el error cuadrático medio (ECM), entre las dos curvas.

$$y_{transformado} = y_{fab} * c$$

Donde, el coeficiente c se optimiza globalmente para minimizar las diferencias entre las curvas en todo el rango de valores de corriente (CURRENT (A)). Este tipo de ajuste no es flexible, ya que aplica un factor fijo en todo el rango, Además, no puede capturar variaciones locales entre las dos curvas, lo que puede llevar a discrepancias en algunos puntos del rango. No obstante, evita deformaciones de la tendencia

de la curva generada por el conjunto de puntos.

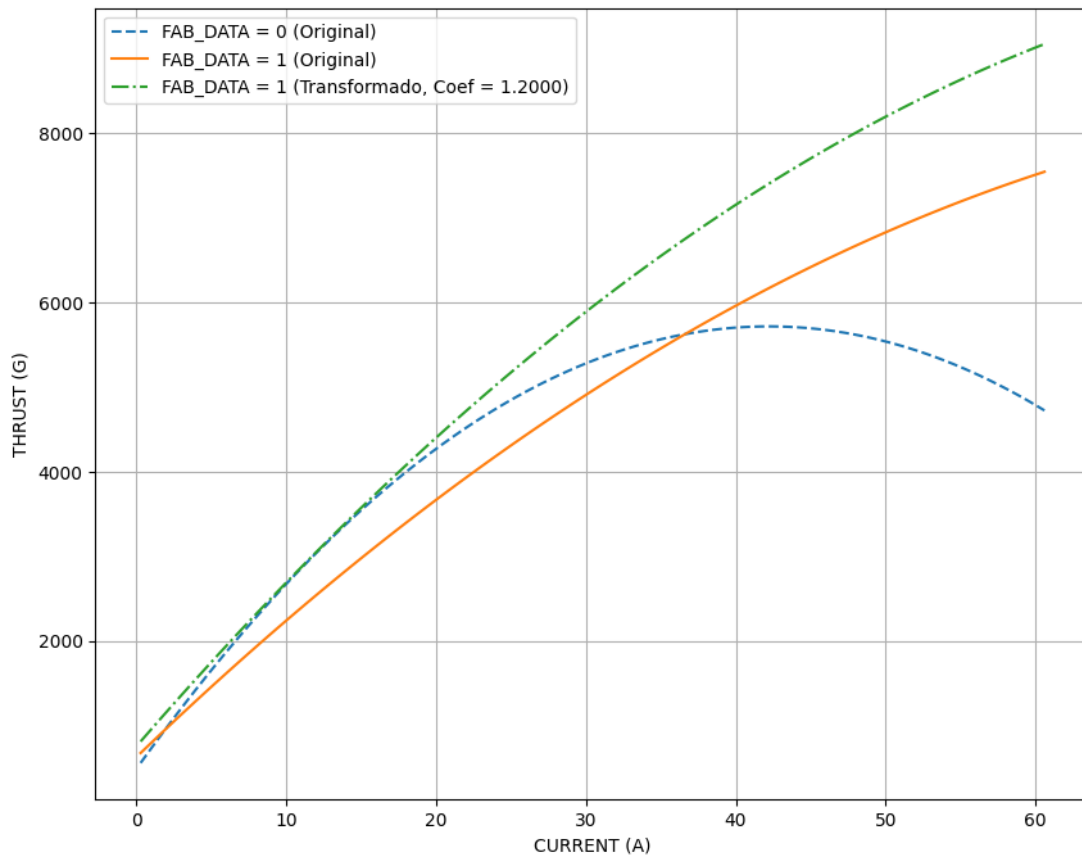


Figura 4.2.9 Ajuste por extrapolación cuantitativa

Iterando sobre diferentes valores, se puede observar como este método permite obtener un coeficiente que sí permitiría cuantificar, de forma aproximada, la diferencia entre ambas bases de datos. Si bien este método no recibe una transformación si no un escalamiento, sí permite obtener un coeficiente que genera la superposición de ambas curvas, aunque sea en parte parcial. No obstante, cabe destacar, que, al evaluar un conjunto propulsor, se analiza sobre todo los valores de consumo intermedios para no hacer trabajar al motor en un régimen por encima (o debajo) del su potencia nominal.

Se continúa trabajando en el estudio y la comparación de diversas técnicas orientadas a definir un factor de corrección que permita optimizar la alineación entre las bases de datos. Este esfuerzo incluye no solo enfoques cuantitativos basados en modelos matemáticos, sino también un análisis cualitativo exhaustivo de aquellas variables que, por su naturaleza compleja o subjetiva, no pueden ser fácilmente representadas en un modelo numérico. Estas variables cualitativas, como condiciones operativas específicas o comportamientos no lineales del sistema, son fundamentales para complementar el desarrollo del factor de corrección y asegurar que este sea robusto y aplicable a una variedad de escenarios. La combinación de ambos enfoques permite avanzar hacia una solución integral que aborde tanto los aspectos medibles como los cualitativos del problema.

4.3. Apartado ALIMENTACIÓN

Debido a las nuevas exigencias derivadas de los casos de uso definidos en el proyecto, se están explorando sistemas de alimentación más avanzados que puedan optimizar las prestaciones del UAV, especialmente en términos de autonomía y carga de pago.

Entre las alternativas consideradas inicialmente, se evaluaron los sistemas cautivos (*tethered systems*), que consisten en alimentar al dron mediante un cable conectado a una fuente de energía en tierra. Esta tecnología permite operaciones de vuelo prolongadas gracias a la eliminación del peso de las baterías principales, dotando al UAV únicamente de una batería de emergencia para casos de fallo del sistema. Además, esta configuración incrementa la capacidad de carga útil del dron, lo cual resulta ventajoso en ciertas aplicaciones específicas.

Sin embargo, el sistema cautivo presenta limitaciones significativas, siendo la más relevante la restricción en el alcance operativo impuesta por la longitud del cable de alimentación. Esta limitación hace que el sistema cautivo no sea adecuado para numerosos casos de uso del proyecto, particularmente aquellos que exigen alta autonomía en áreas geográficas amplias o escenarios con requerimientos de movilidad. Aunque este tipo de solución puede resultar útil en aplicaciones estáticas, como la extensión de cobertura en eventos localizados o situaciones de emergencia, no cumple con los estándares de versatilidad y flexibilidad operativa necesarios para abordar un rango más amplio de misiones.

Por estas razones, el sistema cautivo ha sido descartado para su integración en el prototipo final. A pesar de su capacidad para ofrecer tiempos de vuelo prácticamente ilimitados al depender de una fuente de energía terrestre y minimizar la necesidad de baterías, la dependencia del cable representa un condicionante crítico. Esto afecta directamente su idoneidad en escenarios que requieren operaciones dinámicas o cobertura extendida, reduciendo de manera considerable la flexibilidad operativa del UAV.

4.3.1. Tecnología del hidrógeno.

En la búsqueda de sistemas de alimentación avanzados para la solución UAV del proyecto, tal y como se comentó en el entregable *6G_SORUS_DRONES_A2.1_E2_Perfilado_Intermedio*, las celdas de hidrógeno emergen como una tecnología innovadora. Este sistema ofrece tiempos de vuelo significativamente prolongados en comparación con las baterías convencionales, además de eliminar restricciones de alcance, ya que no depende de conexiones físicas al suelo.

Sin embargo, la incorporación de celdas de hidrógeno no está exenta de desafíos. Uno de los principales condicionantes es el peso añadido que supone el sistema, compuesto por depósitos de hidrógeno, celdas de combustible, reguladores y otros elementos asociados. Este incremento de peso afecta directamente a la capacidad de carga útil del UAV, lo que puede limitar su operatividad en escenarios que requieren transportar equipos específicos o cargas de mayor volumen.

Además, su integración en los prototipos implica un diseño cuidadoso de ensamblajes y compatibilidad con el resto de los sistemas del dron, así como la necesidad de realizar ensayos exhaustivos para

garantizar el cumplimiento de las prestaciones requeridas.

Por estas razones, aunque las celdas de hidrógeno presentan oportunidades claras para avanzar en la autonomía y sostenibilidad de los UAV, su implementación sigue en fase de evaluación.

Se continúa estudiando la viabilidad técnica, económica y operativa de esta tecnología, considerando los desafíos asociados a su peso y los requisitos adicionales de integración. Este análisis detallado es esencial para determinar si las celdas de hidrógeno pueden convertirse en una solución viable y competitiva para los objetivos del proyecto. Como ejemplo, se detallan dos casos que se están monitorizando de forma cuidadosa: Empresas como **Intelligent Energy**, **Heven Drones**, **H2 Dron Energy** y **Hogreen Air** están liderando la integración de esta tecnología en sistemas embarcados.

Intelligent Energy desarrolla celdas de combustible PEM que destacan por su ligereza y eficiencia. Su producto más avanzado, el IE-SOAR 2.4, proporciona 2.4 kW de potencia y permite operaciones prolongadas para UAV de ala fija, multirrotores y VTOL. Además, el modelo IE-SOAR 800 ofrece 800 W de energía continua con tiempos de recarga rápidos, lo que reduce significativamente los periodos de inactividad. Estas soluciones no solo aumentan la duración del vuelo, sino que también abren nuevas posibilidades para misiones complejas en áreas extensas.

Por su parte, **Heven Drones** ofrece soluciones innovadoras en el ámbito de UAV impulsados por hidrógeno, destacándose su modelo H2D55. Este dron permite tiempos de vuelo de hasta 90 minutos con una capacidad de carga útil de 5 kg (11 libras) y un peso máximo al despegue de 29.5 kg (65 libras). Diseñado para tareas que requieren larga autonomía y precisión, este sistema alimentado por hidrógeno combina eficiencia y sostenibilidad energética. Sin embargo, **Heven Drones** opera bajo un sistema cerrado, lo que puede representar un desafío en términos de flexibilidad para integrar hardware adicional o personalizar el dron según las necesidades específicas de diferentes misiones. Aunque el hidrógeno proporciona una ventaja significativa en autonomía, es crucial que estos sistemas sean compatibles con una amplia gama de componentes electrónicos. Esto incluye la capacidad de comunicar y sincronizar con diferentes sistemas de control y navegación, así como la posibilidad de incorporar diversas cargas de pago según el caso de uso, como cámaras avanzadas, sensores especializados o antenas de comunicación.

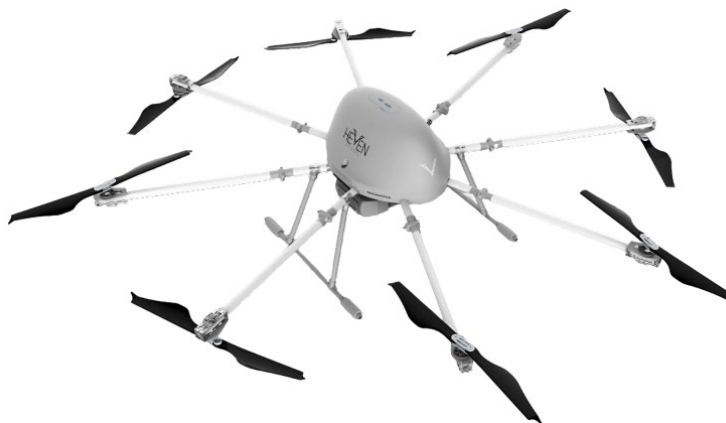


Figura 4.2.1 H2D55 Heven Drones [2]

H2 Dron Energy [3] se centra en el desarrollo de soluciones comerciales basadas en hidrógeno,

dirigidas a aplicaciones como vigilancia e inspección. Sin embargo, estas soluciones permanecen en un marco experimental, con limitaciones relacionadas con el peso añadido por los sistemas de hidrógeno y la necesidad de validar su fiabilidad en entornos reales. Si bien han demostrado potencial en escenarios específicos, aún son necesarias pruebas más robustas y una optimización tecnológica para su implementación operativa en misiones dinámicas y de alta demanda energética.



Figura 4.2.2 Dron h2 drone energy

De manera similar, **Hogreen Air** [4] desarrolla drones híbridos alimentados por hidrógeno que buscan combinar flexibilidad y autonomía para aplicaciones industriales. Sin embargo, su tecnología también está en una etapa experimental, donde las barreras tecnológicas, como la estandarización de componentes y la integración con cargas de pago diversas, limitan su viabilidad práctica.

La transición de estas tecnologías desde un marco experimental hacia aplicaciones plenamente operativas requiere superar diversos desafíos. Entre ellos destacan la necesidad de optimizar el peso de los sistemas, garantizar la interoperabilidad con diferentes componentes electrónicos y asegurar la sostenibilidad económica de su adopción.

4.3.2. Tecnologías de baterías.

De forma simultánea al estudio de nuevas tecnologías, se ha continuado trabajando en las baterías de uso actual, que ofrecen una operativa consolidada, a pesar de que su rendimiento ha mejorado a menor velocidad de la esperada hace pocos años con la aparición de materiales "milagro" como el Grafeno, cuyo fusión con la tecnología Li-Po auguraba unos rendimientos espectaculares en capacidad de descarga, número de ciclos de carga, durabilidad, adaptabilidad de formas, y otros factores que, desgraciadamente, no se han cumplido. Otras tecnologías, como es el caso de baterías metal-aire o de sodio-ion, no resultan aplicables a la tecnología de los drones por su elevado peso, baja capacidad de descarga y, en general, se sitúan todavía en estados de desarrollo muy iniciales como para tenerlas en consideración.

De esta forma, para el proyecto SORUS, se ha decidido continuar con el uso de baterías Li-Po cualificadas gracias a los estudios realizados, lo que permite seleccionar proveedor, tipo de batería (en cuanto a capacidad y relación capacidad/peso/número de baterías embarcadas) y definir la operativa de uso y gestión de las mismas, mejorando la eficiencia de uso. Se continuará estudiando la posibilidad

de incorporar una combinación de baterías Li-Po y Li-Ion en el conjunto de sistemas del UAV, como forma de optimización del sistema de alimentación.

Se continuará estudiando la posibilidad de incorporar una combinación de baterías Li-Po y Li-Ion en el conjunto de sistemas del UAV, como forma de optimización del sistema de alimentación. Esta combinación proporcionaría por un lado la capacidad de descarga que tienen las baterías de LiPo y la alta densidad energética que tienen las baterías de Li-Ion. Para poder realizar dicha combinación es necesario incorporar un elemento de gestión de baterías que realice los cambios de alimentación de unas a otras.

Actualmente, las celdas de Li-Ion más usadas son del modelo 18650, (18mm de diámetro y 65 mm de largo) pero están saliendo al mercado baterías con igual densidad energética o incluso mayor en modelos de mayor capacidad, como son las 21700 (21mm de diámetro y 70 mm de largo) con capacidades de hasta 5000mAh, o las 26650 (26mm de diámetro y 65 mm de largo) con capacidades de hasta 6000mAh



Figura 4.2.3 Baterías Li-Ion

La densidad energética máxima de una batería de iones de litio de 26650 cuyas características son, peso 98g, Voltaje nominal 3.7V y acumulación máxima 6.000mAh = 22.2Wh, es aproximadamente **217Wh/Kg** pero la capacidad de descarga no llega a 4C

La densidad energética máxima de una batería de polímero de litio es aproximadamente **150-175Wh/Kg** pero la capacidad de descarga puede llegar a 100C

4.4. Apartado ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

En el entregable *6G_SORUS_DRONES_A2.1_E2_Perfilado_Intermedio* se destacó la importancia de integrar sistemas robustos y fiables para garantizar la conectividad entre los UAVs y los equipos de tierra. Se introdujo un sistema inicial basado en una Raspberry Pi 4, un módem 4G y el software UAVCast, que habilita las comunicaciones básicas en tiempo real, permitiendo evaluar la viabilidad de estas soluciones. Además, se identificaron desafíos críticos, como la necesidad de gestionar de manera eficiente las direcciones IP en redes móviles, particularmente en escenarios donde los drones cambian de nodo de conexión.

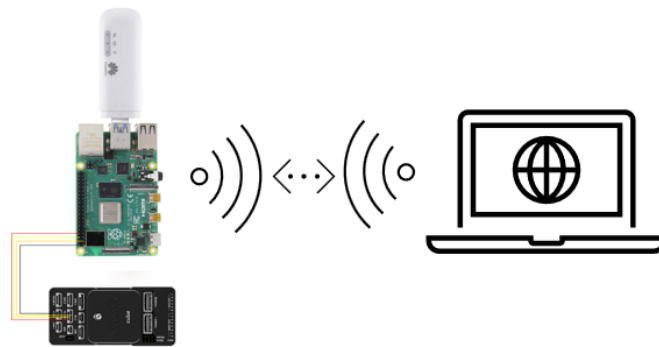


Figura 4.3.1 Esquema de comunicaciones 4G (Pixhawk, Raspberry Pi y modem 4G LTE USB)

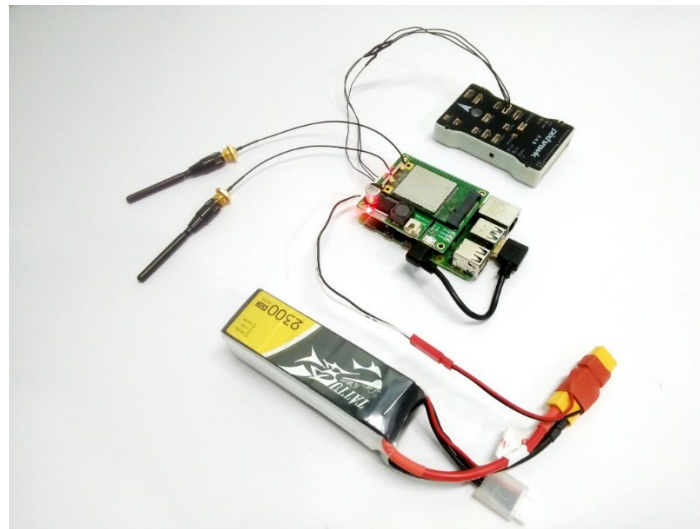


Figura 4.3.2 Montaje de comunicaciones 4G (Pixhawk, Raspberry Pi y modem 4G LTE USB)

Para abordar estas limitaciones, se está trabajando en estrategias basadas en la implementación de VPNs, con alternativas que incluyen tanto la generación de redes propias como el uso de servicios externos, marcando un camino hacia una conectividad más estable y escalable. La conectividad entre dispositivos se sustenta en la asignación y gestión de direcciones IP, elemento esencial para garantizar el envío y recepción fiable de datos entre los drones y los equipos de tierra. Cuando un dispositivo, como el dron, cambia de nodo de conexión, la red modifica su IP pública, lo que afecta gravemente la continuidad de la comunicación. Este problema se intensifica en entornos de alta movilidad, como el vuelo de drones, donde estos pueden cruzar múltiples nodos y, en algunos casos, operar incluso entre

países. Para mitigar este inconveniente, se plantea la necesidad de una IP fija que permita mantener las comunicaciones dirigidas siempre hacia la misma dirección, independientemente de los cambios en la red pública.

La solución propuesta para lograr esta consistencia es el uso de una VPN (Red Privada Virtual), que crea un túnel seguro y estático entre los dispositivos conectados. Dentro de esta estrategia se consideran dos enfoques principales:

1. Generar una VPN propia:

- Esta opción es más segura, pero para que funcione hay que tener un equipo, que será el servidor de red, conectado siempre que se quiera hacer uso de dicha red. En este servidor se instala un software para que genere la red virtual y la gestione.



Una buena opción para la generación de redes virtuales es el software de código abierto, OpenVPN. Este software se instalará dentro del procesador de SORUS BOX (en este caso una Raspberry Pi modelo 4). Cada vez que un SORUS BOX se conecte a Internet, automáticamente se conectará a OpenVPN y notificará que está activo, con lo cual siempre estará visible en Internet, pero solo accesible a los dispositivos que estén conectados a esa VPN.

2. Uso de servidores VPN externos:

- Esta segunda opción es hacer uso de servidores de VPN, gratuitos o de pago, disponibles en Internet. Uno de estos servidores, usados habitualmente es Zero Tier One. Este servicio de Internet sustituiría al servidor que se explica en el caso anterior. Zero Tier One dispone de diferentes softwares para diferentes equipos. Este software se instalará dentro del procesador de SORUS BOX (en este caso una Raspberry Pi modelo 4). Cada vez que un SORUS BOX se conecte a Internet, automáticamente se conectará a Zero Tier One y notificará que está activo, con lo cual siempre estará visible en Internet, pero solo accesible a los dispositivos que estén conectados a esa VPN.



Ambas opciones permiten mantener las comunicaciones estables y dirigidas hacia una dirección IP única, resolviendo los problemas derivados de la movilidad y los cambios en la red pública. De esta manera, el proyecto avanza hacia un modelo de conectividad robusto y adaptado a las exigencias de los drones en entornos operativos complejos.

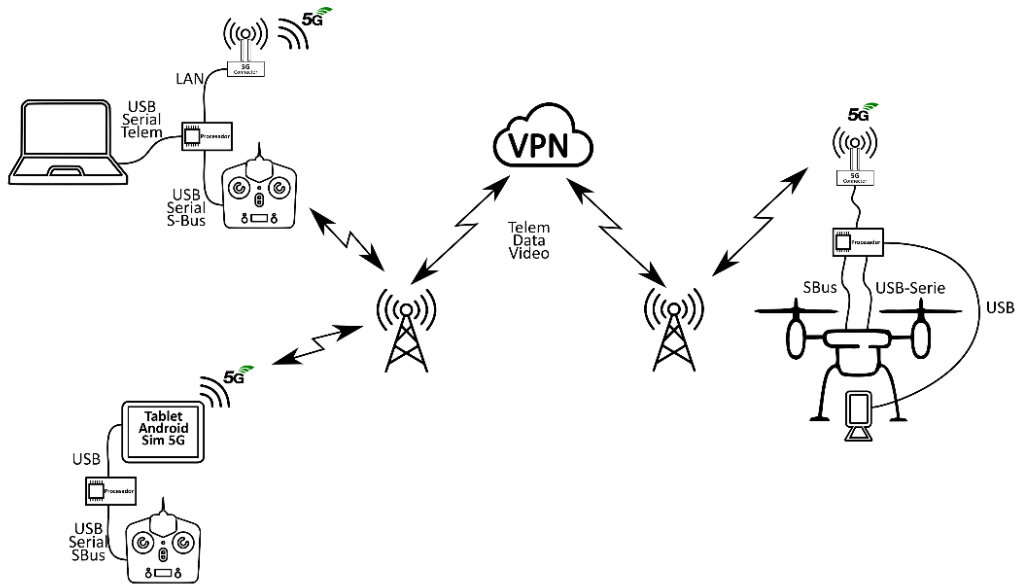


Figura 4.3.3 Esquema global de dispositivos electrónicos y elementos virtuales interconectados.

La Figura 4.3.3 muestra un esquema funcional para la comunicación entre un dron y dispositivos de control utilizando redes 4G/5G y una red privada virtual (VPN). Los equipos en tierra, como ordenadores portátiles, tabletas Android y emisoras de radio control, se conectan mediante dongles o routers 5G, permitiendo la transferencia de telemetría y comandos a través de señales USB y protocolos como SBUS.

Una VPN centraliza la comunicación, creando un túnel seguro para el intercambio de datos, control y transmisión de vídeo, incluso en redes públicas o ubicaciones remotas. Las estaciones base 5G intermedian entre los dispositivos y el dron, asegurando la conectividad en escenarios de alta movilidad. El dron, equipado con una Raspberry Pi, un módem 5G y puertos USB, gestiona comandos y envía datos de telemetría y vídeo en tiempo real, garantizando una comunicación robusta y fiable entre todos los componentes del sistema.

Actualmente, este sistema está siendo configurado y probado en el laboratorio para validar su funcionalidad. Véase a continuación los montajes realizados (Figura 4.3.4):

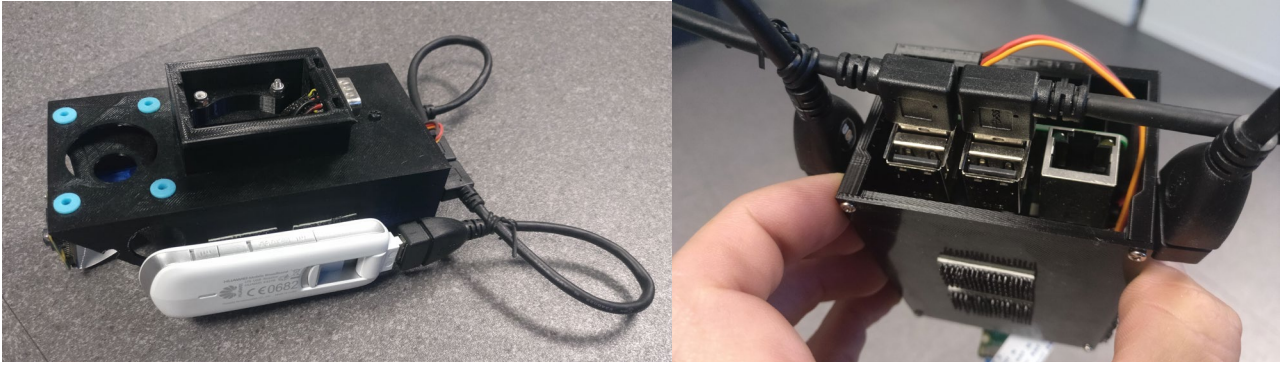
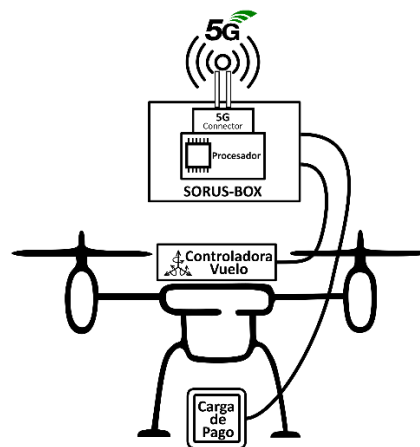


Figura 4.3.4 Montajes realizados para la gestión de IPs y transferencia de datos.

La comunicación con la electrónica de vuelo es un elemento esencial en el desarrollo de la solución UAV del proyecto debido a su capacidad para garantizar un control eficiente, fiable y adaptable a distintos escenarios operativos.



En este caso, la integración de una placa de vuelo PX4, derivada del proyecto de código abierto PixHawk, ofrece una base sólida y versátil para la implementación de sistemas de control. Esta controladora no solo destaca por su fiabilidad, sino también por su capacidad de configuración, permitiendo la compatibilidad con diversos equipos de mando y modos de operación.

- Mandos de radiocontrol profesionales derivados del aeromodelismo de alta gama.
- Mando propio (Pilot Pro) con tablet conectada para la visualización del video generado desde el equipo, ya sea el FPV o el propio de grabación.
- Mando Herelink de la misma empresa que sustenta el proyecto open source Pixhawk, con tablet conectada para la visualización del video generado desde el equipo, ya sea el FPV o el propio de grabación.

También, ofrece la posibilidad de volar el equipo directamente desde un ordenador y una comunicación bidireccional con la telemetría y mando a través de un ordenador. Gracias al lenguaje de comunicación MavLink, es posible tener un control de todos los parámetros del dron, ya sean del vuelo, de

complementos del dron o de la carga de pago embarcada. Y otras de las prestaciones que proporciona son:

- Telemetría y envío de misiones para ejecutar de manera automática.
- Posibilidad de controlar el dron directamente por órdenes desde un ordenador.
- Posibilidad de controlar el dron desde un dispositivo de control estilo Joystick conectado al ordenador.

La integración de la comunicación con la electrónica de vuelo a través de la controladora PX4, basada en el proyecto PixHawk, se posiciona como un componente clave en el desarrollo de la solución UAV del proyecto. Su fiabilidad, versatilidad y capacidad de configuración permiten satisfacer las diversas necesidades operativas, y refuerzan la adaptabilidad y eficiencia del sistema, asegurando que el UAV sea una herramienta robusta y flexible para cumplir con los exigentes requisitos de operación en diversos escenarios.

4.5. Apartado CARGA DE PAGO

Con respecto al apartado de CARGA DE PAGO, se está llevando a cabo un análisis paralelo de las posibles opciones y soluciones.

Este enfoque incluye la estandarización de parámetros clave, como el peso de la carga, su impacto en el MTOW y su relación con el balance de la propulsión; los sistemas de anclaje mecánico y electrónico para una integración eficiente; y los sistemas de control, considerados dentro del conjunto funcional de la SORUS BOX.

En cuanto a los sistemas de anclaje, AEROTOOLS ha desarrollado un sistema de conectividad denominado **anclaje multiplataforma Cola de Milano**, diseñado específicamente para optimizar la integración entre el dron y su carga de pago. Este sistema ha demostrado su eficacia y funcionalidad a lo largo del tiempo, convirtiéndose en una solución confiable para soportar una amplia variedad de cargas útiles en diversas aplicaciones.

El diseño de la Cola de Milano permite sustentar cargas de hasta 15 kg sin comprometer la estabilidad del dron ni la seguridad de la carga. Este sistema cuenta con una fijación mediante un pestillo automático que garantiza que la carga de pago se mantenga firmemente en su posición, evitando movimientos indeseados y asegurando una conexión continua entre el dron y los dispositivos embarcados. Esta robustez facilita el manejo de cargas pesadas y dispositivos sensibles durante misiones críticas.

El anclaje integra numerosos canales de conectividad, con un total de 11 vías de comunicación entre la carga de pago y el sistema Dron-Tierra. Estos canales permiten el control del movimiento del gimbal, la transmisión de señales de vídeo, audio y datos de sensores, así como el manejo de los dispositivos específicos de la carga útil. Esto asegura una comunicación fluida y eficiente para una amplia variedad de aplicaciones operativas.

Además de las capacidades de conectividad, el sistema proporciona suministro eléctrico confiable para la carga de pago. Ofrece una salida de 25V con un máximo de 10A y otra de 5V también con hasta 10A, lo que permite alimentar tanto dispositivos de alta potencia como equipos más sensibles. Este diseño integrado de conectividad y alimentación eléctrica refuerza la funcionalidad del sistema y lo convierte en una solución integral para las operaciones con UAV.

Se está llevando a cabo una colaboración junto a la empresa SixArms, con sede en Australia, que se centra en proporcionar dispositivos avanzados para la medición de radiofrecuencias, especialmente en aplicaciones relacionadas con radiodifusión y telecomunicaciones.

La incorporación de estas capacidades en el prototipo final del dron representa una oportunidad clave para optimizar su desempeño en escenarios complejos que demandan análisis de espectro y caracterización de señales.

Actualmente, se está a la espera para poder iniciar los ensayos, paso fundamental para evaluar la compatibilidad técnica y operativa del equipo con el sistema UAV, así como para planificar pruebas exhaustivas que validen su funcionalidad en entornos reales. Sin embargo, el proyecto no se limita a esta única colaboración.

En paralelo, se sigue ampliando el alcance de búsqueda de soluciones hacia empresas que ofrecen dispositivos avanzados para cumplir con los objetivos del proyecto. Entre estas, destaca Colibrex, una empresa alemana reconocida por su especialización en soluciones de medición de radiofrecuencia (RF) aplicadas a radiodifusión y telecomunicaciones. Se centra en el desarrollo de tecnologías innovadoras que permiten un análisis detallado y preciso del espectro radioeléctrico, una capacidad clave para los escenarios operativos definidos en el proyecto SORUS.

Colibrex ofrece dispositivos portátiles y embarcables diseñados específicamente para integrar en plataformas aéreas como drones. Estos dispositivos están equipados con sensores de alta precisión que permiten caracterizar las frecuencias de transmisión, mapear áreas de cobertura y detectar posibles interferencias en tiempo real. Estas características los convierten en una opción idónea para aplicaciones relacionadas con la generación de mapas de cobertura y la optimización de redes 5G/6G.

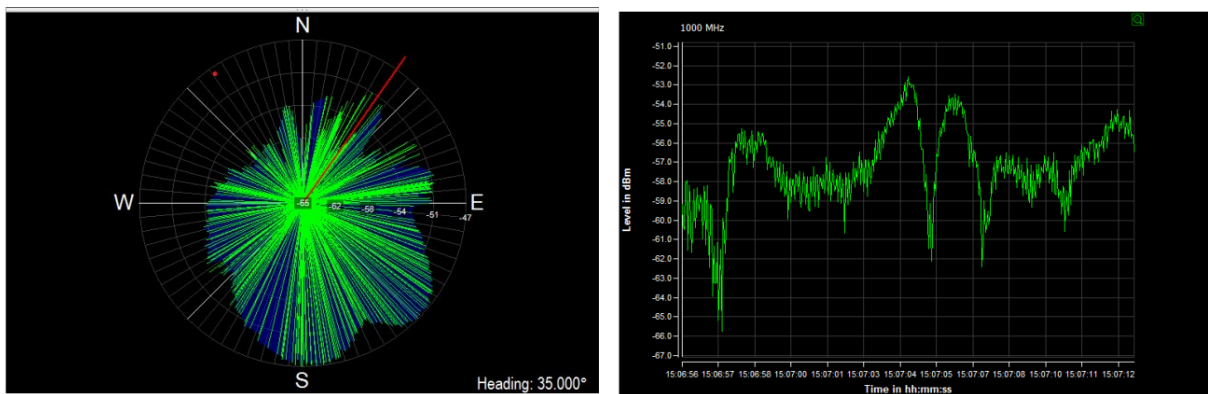


Figura 4.4.1 Análisis de radio frecuencia radial

En la Figura 4.4.1, se presentan las gráficas resultantes a partir de un análisis de radiofrecuencia radial, en el cual el dron realiza una rotación sobre su eje y analiza el espectro de RF utilizando una antena de alta directividad. Este procedimiento permite identificar con precisión el ángulo exacto desde el cual se emiten las radiaciones hacia la ubicación del dron.

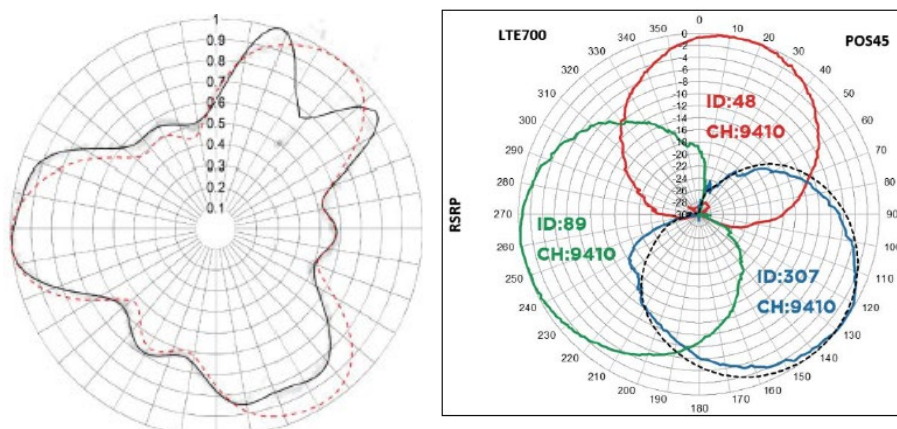


Figura 4.4.2 Análisis de radio frecuencia concéntrico a la antena

En la Figura 4.4.2, se presentan las gráficas resultantes de un análisis de radio frecuencia concéntrico a la antena, es decir el dron se desplaza en un movimiento equidistante de la antena y analiza el espectro

de RF con una antena muy directiva mostrando claramente cual es la potencia recibida exacta en cada punto. Estas trayectorias concéntricas se realizan a diferentes distancias de la antena para poder realizar un mapa de datos lo más completo posible.

A continuación se muestra el ejemplo de un dron portando medidor de RF una antena directiva multifrecuencia de ángulo cerrado con posibilidad de orientación vertical u horizontal. (Figura 4.4.3)



Figura 4.4.3 Dron portando medidor de RF una antena directiva multifrecuencia de ángulo cerrado con posibilidad de orientación vertical u horizontal.

Actualmente, se está en proceso de evaluación exhaustiva de la compatibilidad de las tecnologías expuestas con los sistemas embarcados del dron, como la SORUS BOX y la carga de pago. A medida que avance este proceso, se planificarán pruebas en laboratorio y en campo para validar su funcionalidad y eficiencia en escenarios reales.

Este enfoque diversificado permite no solo ampliar las opciones tecnológicas disponibles, sino también identificar soluciones altamente innovadoras que aseguren el cumplimiento de los requisitos específicos del proyecto.

5. Análisis de coste y operativo

A continuación, se presenta un estudio de costes relacionados y asociados con el diseño, desarrollo, fabricación y operación de un dron con funcionalidades avanzadas destinado a satisfacer las necesidades de uno o varios casos de usos con requisitos compatibles. Este análisis pretende ofrecer una herramienta de gestión que permita dimensionar proyectos de similares características, anticipar costes y distribuir recursos para alcanzar los objetivos de proyecto, incluyendo tanto los componentes físicos como los recursos necesarios para el desarrollo de funcionalidades, su operación y la gestión inherente a un proyecto de desarrollo tecnológico.

Costes de Desarrollo

En este apartado se evalúan los costes asociados al desarrollo de funcionalidades avanzadas que pueda embarcar el dron de proyecto, siguiendo el enfoque de trabajar los diferentes sensores asociados a las funcionalidades de forma aislada para conseguir avances incrementales de forma ágil e ir convergiendo poco a poco en la integración de todos los desarrollos en el prototipo final.

Elemento	Coste Estimado (€)	Porcentaje (%)	Descripción
Investigación y diseño	160.000,00 €	28,42%	Análisis estado del arte, diseños, funcionalidades avanzadas, análisis sensores...
Prototipos preliminares	25.500,00 €	4,53%	Impresión 3D piezas específicas, fabricación prototipos funcionales en fases incrementales
Pruebas de vuelo	7.500,00 €	1,33%	Pruebas en laboratorio, campo de vuelo, ajustes de software y hardware.
Desarrollo de software e integración de sensores	185.000,00 €	32,87%	Integración sensórica de navegación con electrónica de vuelo, comunicaciones de control y transferencia de datos
Desarrollos de carga de pago	125.000,00 €	22,21%	Análisis de cargas de pago, integración y operación adaptada a casos de uso
Total Desarrollo	503.000,00 €	89,36%	

El porcentaje se calcula sobre el total de costes incurridos (diseño, fabricación, operación) en llevar el proyecto de desarrollo de un dron con funcionalidades avanzadas hasta su puesta en operación, sin tener en cuenta la cantidad dedicada a gestión de proyecto.

Fabricación

En este apartado se considera la fabricación de una unidad de prototipo, sin entrar en posibles economías de escala que se consiguen con una producción enfocada a un mayor número de unidades, con el objetivo de servir de base conservadora para la estimación de costes.

Componente	Coste Unitario (€)	Porcentaje (%)	Descripción
Estructura y plataforma de vuelo	4.850,00 €	0,86%	Piezas de estructura y específicas (materiales compuestos y avanzados, fibra de carbono, aluminio aeronáutico...)
Motores , hélices, variadores	1.750,00 €	0,31%	Motores brushless, hélices de alta resistencia.
Baterías	1.950,00 €	0,35%	Baterías de alta capacidad (LiPo o Li-ion), con electrónica de control
Electrónica de vuelo	3.540,00 €	0,63%	Sistema de navegación y control avanzado, GCS
Sensores de navegación	4.500,00 €	0,80%	Sensores de proximidad, LIDAR de navegación...
Transmisión y comunicación	1.650,00 €	0,29%	Comunicaciones 4G/5G, telemetría...
Software y electrónica	7.560,00 €	1,34%	Integración de sensores, computación embarcada
Carga de pago	10.500,00 €	1,87%	Sensores embarcados en función de casos de uso
Ensamblaje y pruebas	1.250,00 €	0,22%	Mano de obra, pruebas de calidad y rendimiento.
Total Fabricación (por unidad)	37.550,00 €	6,67%	

Costes de Operación

En los costes de operación se ha optado por simplificar las variables a considerar, centrándose en aquellas relacionadas específicamente en la puesta en operación del dron y dejando al margen las relativas a coste de personal o tiempo de operación, las cuales pueden estar sujetas a factores que se escapan del alcance de este proyecto. Pero el planteamiento sirve para tener una idea clara de este apartado tan importante cuando se quiere llevar un desarrollo al punto de operación.

Elemento	Coste Estimado (€)	Porcentaje (%)	Descripción
Estación de control terrestre	4.500,00 €	0,80%	Ordenador dedicado, software de navegación, auxiliares
Baterías para operación continua	5.900,00 €	1,05%	Baterías de alta capacidad (LiPo o Li-ion), con electrónica de control
Equipo de recarga y transporte	5.500,00 €	0,98%	Generador, cargadores, maletas estancas y resistentes, equipo auxiliar
Mantenimiento y repuestos	1.950,00 €	0,35%	Hélices, baterías de repuesto, calibración.
Formación de operadores	3.250,00 €	0,58%	Capacitación en uso y mantenimiento del dron.
Seguro de operación	1.250,00 €	0,22%	RC, cobertura por daños propios o accidentes.
Total Operación	22.350,00 €	3,97%	

Resumen por partidas

Finalmente, la agrupación por apartados permite obtener una estimación del coste total de proyecto, a lo que habrá que añadir la partida que engloba a gastos fijos de gestión (costes laborales, costes de instalaciones y administrativos...) que se suelen cuantificar en un 15% del coste variable de proyecto, valor que ha sido considerado para ofrecer un resultado global estimado que se ajuste al máximo a la realidad de proyectos de desarrollo.

Resumen por partidas	Coste Estimado (€)	Porcentaje (%)
Desarrollo	503.000,00 €	89,36%
Fabricación	37.550,00 €	6,67%
Operación	22.350,00 €	3,97%
Subtotal	562.900,00 €	100,00%
Gastos fijos de gestión (15% de los costes de proyecto)	84.435,00 €	
Total	647.335,00 €	

6. Conclusiones

El proyecto **SORUS-DRONE** ha profundizado en el estudio y análisis de las soluciones planteadas para satisfacer los Casos de Uso y avanzado significativamente en la iteración final de la fase de perfilado, abordando de manera integral los distintos apartados que conforman el desarrollo de un UAV robusto y funcional. La generación de datos y documentación ha tenido diversas fuentes, desde la información de fabricantes, los ensayos de laboratorio, el conocimiento propio adquirido y la proyección a fórmulas de extrapolación, hasta la validación en pruebas de campo, en un proceso complejo que se ha compilado en el Modelo de Predicción de Prestaciones (MPP) y da como resultado la selección cualificada de las mejores soluciones para los casos concretos en estudio.

En la **Plataforma de Vuelo**, se ha trabajado en configuraciones multirrotores que maximizan la estabilidad de prestaciones y adaptabilidad funcional para atender escenarios diversos, descartando alternativas extremas, como los VTOL (acrónimo de drones de despegue vertical que pueden volar en línea apoyándose en planos aerodinámicos sin necesidad de recurrir de forma permanente a la sustentación generada por rotores verticales, como es el caso de los multirrotores), debido a sus limitaciones para los casos de uso planteados y al retraso en la implementación de una legislación que posibilite de forma práctica la realización de vuelos en modo BVLOS (más allá de la vista) en equipos pesados.

En el apartado de **Propulsión**, los estudios con ensayos en banco de pruebas validados, han permitido conocer las prestaciones de diversas combinaciones de motores y hélices, y ajustar la selección de soluciones eficientes en términos de empuje y consumo energético. Además, de facilitar filtros de selección, el conocimiento adquirido permitirá una mejor gestión operativa a lo largo de la vida útil de los equipos, aportando un conocimiento predictivo de especial relevancia para anticipar posibles fallos que puedan afectar a la operación a los propios equipos.

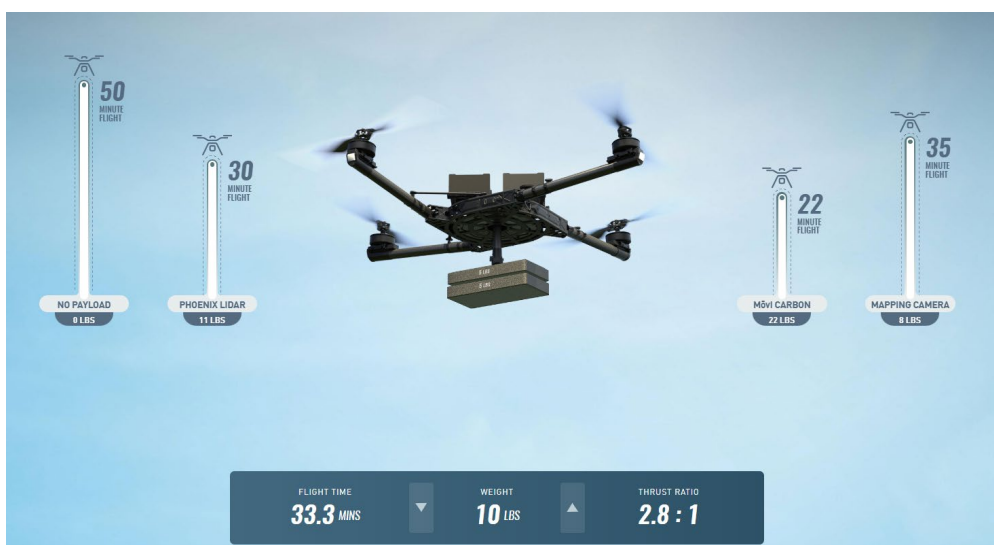
En cuanto al **Sistema de Alimentación**, las baterías actuales y la evolución de su tecnología han sido evaluadas en profundidad, teniendo en cuenta el estado del arte y cómo ha evolucionado en los últimos años, en los que se observa cierto estancamiento en las opciones disponibles que ofrezcan fiabilidad suficiente para integrarlas en sistemas operativos. Otras tecnologías innovadoras como la de celdas de hidrógeno para la generación de electricidad en motores eléctricos para extender la autonomía del UAV, han sido también analizadas con detalle, detectándose que se enfrentan aún a desafíos importantes, como pueden ser el peso del conjunto, la eficiencia energética o la integración operativa, que obligan a descartar su uso en el presente proyecto. No obstante, la solución adoptada permitiría en un futuro la adopción de soluciones innovadoras en este campo.

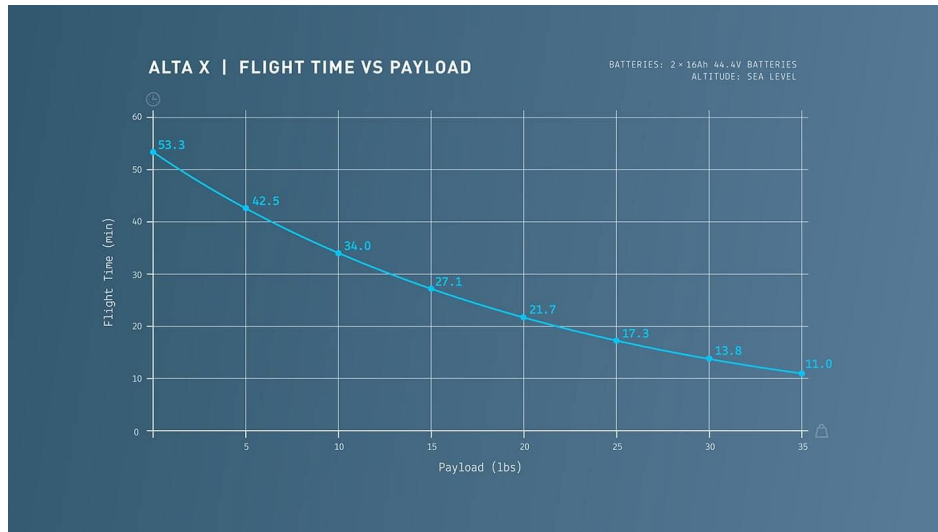
En el apartado de **Electrónica y Comunicaciones** se está trabajando en varias líneas que permitan alcanzar y consolidar una solución de conectividad robusta mediante redes 4G/5G y el uso de VPNs teniendo en cuenta el estado actual de las redes de comunicación y las herramientas y tecnologías disponibles para la conexión remota de equipos que deban trabajar de forma coordinada y simultánea. La solución identificada como SORUS BOX en el proyecto, que irá integrada en el UAV, tiene como objetivo proporcionar comunicaciones estables en entornos de alta movilidad a la vez que facilita la integración de dispositivos que puedan potenciar las funcionalidades buscadas.

Finalmente, en el apartado de **Carga de Pago** se ha mantenido un enfoque abierto para alcanzar la necesaria adaptabilidad de la solución definida. Este factor ha condicionado la selección final, pues deja fuera a equipos de grandes prestaciones, pero con carácter cerrado (con muy poca capacidad de conexión entre sensores y electrónica de vuelo y de intercambio de sensores de carga de pago) y pone en valor la selección de un equipo abierto y con alta capacidad de adaptación e intercomunicación. En el proyecto, se ha avanzado en la estandarización de los sistemas de anclaje y conectividad, un aspecto fundamental para facilitar la modularidad de los sistemas integrados y la innovación continua en el desarrollo, destacando el sistema propio de AEROTOOLS de Cola de Milano, que soporta hasta 15 kg con canales múltiples de comunicación y suministro eléctrico confiable, lo que permite la conexión de diferentes cargas de pago. Además, se han explorado colaboraciones con empresas líderes para integrar dispositivos avanzados de medición y análisis, ampliando las capacidades del UAV en aplicaciones específicas.

Dentro de este contexto, tras un exhaustivo análisis, se tiene definido el **PROTOTIPO FINAL** establecido como uno de los objetivos del proyecto, el cual se describirá y caracterizará de forma detallada en el entregable **6G_SORUS_DRONES_A3.2_E3_Prototipo_Final** que tiene prevista su entrega (según ampliación de proyecto acordada) en junio de 2025. Este prototipo, denominado AT25 en documentación anterior de proyecto, estará basado en una plataforma de vuelo abierta que integrará los desarrollos y optimización llevados a cabo en el proyecto.

La plataforma de vuelo se articula en torno al dron AltaX, que destaca por su fiabilidad de funcionamiento y por su capacidad de elevar cargas de pago de más de 10 kg con tiempos de vuelo superiores a los 20 minutos, lo que lo convierte en una opción ideal para transportar una amplia gama de cargas útiles. Es relevante también el uso de electrónica de vuelo abierta e innovadora, requisitos necesarios para la integración de los desarrollos en curso, con excelente compatibilidad con dispositivos de carga de pago y controladoras que permiten ejecutar scripts avanzados. Estas características habilitan la captura y procesamiento de datos directamente desde la carga, permitiendo una integración fluida con el SORUS BOX para realizar tareas en Edge Computing, además de permitir una conectividad de alta velocidad proporcionada por redes 4G/5G.





Actualmente, se están llevando a cabo los procesos finales de acopio de equipamiento, ensamblaje y pruebas, a la vez que se continúa con los desarrollos de funcionalidades dentro del marco del proyecto.

Referencias

- [1] «BOE,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2012/224/L00001-00085.pdf>.
- [2] HEVEN DRONES, [En línea]. Available: <https://hevendrones.com/hydrogen-drones/>.
- [3] h2 dron energy, [En línea]. Available: <https://h2dronenergy.com/producto/>.
- [4] Hogreen Air, [En línea]. Available: https://www.hogreenair.com/drone_eng/page/?pid=drone_skill02#content.
- [5] M. A. S. , N. A. A. I. B. A. , b. A. a. S. K. M. Adnan Shahid Khan, «A Survey on 6G Enabled Light Weight Authentication Protocol for UAVs, Security, Open Research Issues and Future Directions».
- [6] M. Keller y K.-H. Weidner, «El análisis de espectro en tiempo real».
- [7] Z. F. Y. Z. Bin Li, «UAV Communications for 5G and Beyond;» 2019.
- [8] G. G. R. N. D. L.-P. Mohamed Benzaghta, «UAV Communications in Integrated Terrestrial and,» 2022.
- [9] V. L. E. N. Debashisha Mishra. Anna Maria Vegni, «Drone Networking in 6G Era,» 2020.
- [10] 5G HEART, «5G Health, Aquaculture and Transport Validation Trials,» 2023.
- [11] 5G PPP, «UPDATE ON 5G TRIALS AND PILOTS FOR CONNECTED,» 2023.
- [12] X. L. M. G. G. M. U. R. A. M. B. ÖMER BULAKÇI, Towards Sustainable and Thrustworthy 6G, 2023.
- [13] Aerotools UAV, «Estado del Arte de los Elementos de Vuelo,» 2022.
- [14] «Inteligencia Artificial,» 2023. [En línea]. Available: <https://inteligenciaartificial.io/machine-learning/>.
- [15] L. V. Blanco, «TFG: Efectos de las interferencias electromagnéticas en la operativa de drones,» 2017.