

Diseño y validación de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva para drones multirrotor

Design and validation of an inductive-charging landing platform for multirotor drones

E. D. Casillas-Parbol¹ , J. A. Cárdenas-Magaña² * 
(*Jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx)

Recibido: 17 de noviembre de 2025 Aceptado: 16 de enero de 2026

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y validación experimental de una plataforma de aterrizaje con carga inalámbrica por inducción y acoplamiento magnético pasivo para Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), orientada a mejorar la autonomía operativa y reducir la intervención humana en el proceso de recarga. La metodología adoptada, de enfoque experimental y aplicado, se estructuró en tres etapas: caracterización del sistema inductivo, diseño y manufactura de la plataforma mediante modelado 3D e impresión en PLA, e integración y evaluación funcional del prototipo mediante pruebas de vuelo y recarga. El mecanismo de centrado magnético tipo MagSafe permitió corregir desalineaciones entre bobinas durante el aterrizaje, garantizando una alineación estable y favoreciendo una transferencia energética eficiente. Los resultados experimentales muestran una reducción del 15 %

en el tiempo total de recarga respecto al método convencional, con una eficiencia promedio del 85 % y variaciones térmicas inferiores a 5 °C. Asimismo, el peso adicional del sistema (≈ 40 g) no afectó la estabilidad ni la autonomía del VANT, manteniéndose un tiempo promedio de vuelo de 5 min 30 s. Las pruebas realizadas en condiciones exteriores confirmaron la estabilidad del dron y la efectividad del acoplamiento magnético. En conjunto, los resultados validan la viabilidad del prototipo como una solución simple, funcional y de bajo costo para la automatización del aterrizaje y la recarga inalámbrica de UAVs, con potencial aplicación en agricultura de precisión, monitoreo ambiental y operaciones autónomas continuas.

Palabras clave: plataforma de aterrizaje, carga inductiva, acoplamiento magnético, drones, autonomía energética

¹Departamento de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula.

²Departamento de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula.



ABSTRACT

This paper presents the design and experimental validation of a landing platform with inductive wireless charging and passive magnetic coupling for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), aimed at improving operational autonomy and reducing human intervention during the recharging process. An experimental and applied methodology was adopted, structured into three stages: characterization of the inductive charging system, design and fabrication of the platform through 3D modeling and PLA additive manufacturing, and functional evaluation of the integrated prototype through flight and charging tests. The MagSafe-type magnetic centering mechanism effectively corrected coil misalignment during landing, ensuring stable alignment and enhancing energy transfer efficiency. Experimental results show a 15 % reduction in total charging time compared to the conventional method, with an average efficiency of 85 % and thermal variations below 5 °C. Additionally, the added system weight (≈ 40 g) did not negatively affect UAV stability or autonomy, maintaining an average flight time of 5 min 30 s. Outdoor tests confirmed both flight stability and the effectiveness of the magnetic coupling during landing. Overall, the results validate the proposed prototype as a simple, functional, and low-cost solution for automating UAV landing and wireless recharging processes, with strong potential for applications in precision agriculture, environmental monitoring, and continuous autonomous operations.

Keywords: *landing platform, inductive charging, magnetic coupling, drones, energy autonomy*

INTRODUCCIÓN

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) se ha incrementado de manera significativa en aplicaciones como agricultura de precisión, monitoreo ambiental, inspección de infraestructuras y vigilancia, debido a su flexibilidad operativa y capacidad de acceso a zonas de difícil alcance. Sin embargo, la autonomía energética continúa siendo una de las principales limitaciones para la operación continua de estos sistemas, ya que la mayoría de los drones comerciales dependen de ciclos frecuentes de recarga o del reemplazo manual de baterías, lo que incrementa los tiempos muertos y la dependencia de la intervención humana. Con el objetivo de mitigar esta problemática, la literatura ha propuesto diversas estrategias para automatizar el suministro energético de los VANTs. Entre ellas destacan los sistemas de intercambio automático de baterías, como el desarrollado por Albert et al. [1], y las plataformas de aterrizaje asistido basadas en sensores y procesamiento de imágenes, capaces de guiar el descenso del dron hacia una base fija con alta precisión [2]. Si bien estas soluciones representan avances relevantes, suelen implicar una elevada complejidad mecánica o no contemplan la transferencia directa de energía al sistema eléctrico del VANT.

En este contexto, la carga inalámbrica por inducción ha emergido como una alternativa prometedora, al permitir la transferencia de energía sin contacto físico y reducir el desgaste de conectores eléctricos. Estudios previos han demostrado la viabilidad de sistemas multipunto de carga inductiva y configuraciones resonantes capaces de alcanzar altas eficiencias energéticas [3]. No obstante, uno de los principales desafíos técnicos asociados a esta tecnología es la pérdida de eficiencia causada por la desalineación lateral y axial entre las bobinas transmisora y receptora, fenómeno ampliamente documentado en la literatura [4]. Investigaciones más recientes han abordado este problema mediante arquitecturas avanzadas que integran visión computacional, control activo y mecanismos de alineación automática para maximizar la eficiencia del acoplamiento inductivo [5], [6]. Asimismo, se han propuesto soluciones que incorporan guías mecánicas o magnéticas para mejorar el centrado entre bobinas [7]. Aunque estos sistemas demuestran un alto grado de integración funcional, su implementación suele implicar mayores costos, requerimientos computacionales elevados y una complejidad que dificulta su adopción en plataformas comerciales ligeras.

A partir de este análisis, se identifica una necesidad específica de soluciones simples, pasivas y de bajo costo que permitan corregir la desalineación residual entre bobinas durante la fase final del aterrizaje, sin recurrir a sistemas activos complejos de visión o control. En este sentido, el presente trabajo se enfoca en el diseño y validación experimental de una plataforma de aterrizaje equipada con un sistema de carga inalámbrica por inducción y un mecanismo pasivo de acoplamiento magnético tipo MagSafe, orientado a mejorar el centrado entre bobinas y la eficiencia de la transferencia energética una vez que el VANT ha aterrizado sobre la base. El objetivo de esta investigación es diseñar y validar experimentalmente una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo, evaluando su impacto en la eficiencia de recarga, la estabilidad del aterrizaje y el desempeño operativo de un VANT comercial, bajo un enfoque de simplicidad estructural, bajo costo y viabilidad práctica.

DESARROLLO DEL TEMA

El desarrollo de sistemas de recarga autónoma para Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) ha adquirido creciente relevancia en la última década, impulsado por la necesidad de extender la autonomía operativa y reducir la intervención humana en aplicaciones como agricultura de precisión, monitoreo ambiental y vigilancia persistente. En este contexto, la literatura ha explorado diversas estrategias, entre las que destacan el intercambio automatizado de baterías, el aterrizaje asistido mediante visión computacional y la transferencia inalámbrica de energía.

Los sistemas de intercambio automático de baterías constituyen una de las aproximaciones más consolidadas para la recuperación rápida de la autonomía. Propuestas como la de Albert et al. [1] demuestran la viabilidad de plataformas mecatrónicas capaces de realizar este proceso de forma autónoma. No obstante, estas soluciones suelen implicar una elevada complejidad mecánica, mayores

costos de mantenimiento y un incremento significativo en el peso y volumen del sistema, lo que limita su aplicación en UAVs comerciales de pequeña y mediana escala.

De manera paralela, se han desarrollado plataformas de aterrizaje autónomo basadas en visión computacional, orientadas a mejorar la precisión del posicionamiento durante el descenso. Trabajos como los de Zúñiga Motato [2], Gómez Redondo [8] y Daniel et al. [9] emplean técnicas de detección visual, marcadores artificiales y redes neuronales profundas para guiar el aterrizaje del UAV con altos niveles de precisión. Sin embargo, la mayoría de estas propuestas se centra exclusivamente en la navegación y el posicionamiento, sin integrar sistemas de transferencia energética.

La carga inalámbrica por inducción ha sido ampliamente investigada como una alternativa para facilitar la automatización del suministro energético y reducir el desgaste mecánico asociado a conectores físicos. Estudios recientes reportan eficiencias superiores al 90 % mediante topologías resonantes avanzadas y diseños optimizados de bobinas [10]– [11]. No obstante, se reconoce de manera consistente que la eficiencia del acoplamiento inductivo es altamente sensible a la desalineación lateral y axial entre bobinas, lo que representa uno de los principales desafíos técnicos para su implementación práctica en UAVs [4].

Con el objetivo de mitigar este problema, diversos trabajos han propuesto sistemas de recarga autónoma altamente integrados que combinan aterrizaje asistido por visión computacional, control en lazo cerrado y mecanismos activos de alineación. Junaid et al. [5] presentan una revisión exhaustiva de estas arquitecturas, mientras que Rohan et al. [6] analizan estrategias avanzadas de alineación que permiten maximizar la eficiencia de la transferencia energética. Si bien estas soluciones demuestran un alto grado de integración funcional, su implementación suele conllevar un incremento significativo en la complejidad del sistema, los requerimientos computacionales y los costos de desarrollo, lo que dificulta su adopción en plataformas ligeras de uso comercial.

En contraste, las soluciones pasivas para la corrección de la desalineación final, basadas en principios mecánicos o magnéticos, han recibido menor atención experimental. Choi et al. [7] proponen el uso de guías magnéticas para mejorar el centrado entre bobinas en sistemas de carga inductiva para UAVs, demostrando que es posible reducir las pérdidas por desalineación sin recurrir a actuadores adicionales. Sin embargo, la evidencia experimental disponible sobre la integración de estos mecanismos pasivos en plataformas reales de aterrizaje y recarga para UAVs comerciales sigue siendo limitada.

A partir de este análisis, se identifica una necesidad específica de soluciones de integración funcional simplificada que permitan corregir la desalineación residual durante la fase final de aterrizaje y recarga inductiva, sin depender de sistemas activos complejos. En este contexto, el presente trabajo se orienta a la validación experimental de un mecanismo pasivo de acoplamiento magnético integrado en una plataforma

de aterrizaje con carga inductiva, evaluando su impacto en la eficiencia de transferencia energética y la viabilidad operativa en un UAV comercial.

La Tabla 1 presenta una síntesis comparativa de investigaciones relevantes en el ámbito del aterrizaje autónomo y la recarga inalámbrica de UAVs, permitiendo contextualizar la contribución específica de este estudio dentro del panorama actual de investigación.

Tabla 1. *Comparativa de investigaciones relevantes sobre aterrizaje autónomo y recarga inalámbrica de UAVs.*

Ref.	Enfoque del estudio	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[1]	Sistema automatizado de intercambio de baterías para UAVs multirroto	Mecanismos electromecánicos de recambio	Incremento de la autonomía operativa sin intervención humana	Alta complejidad mecánica y costos elevados de mantenimiento
[12]	Estación de recarga para drones agrícolas basada en energía renovable	Paneles solares y transferencia inductiva	Reducción significativa del tiempo de recarga y operación sostenible	Escalabilidad limitada por la capacidad fotovoltaica
[3]	Sistema multipunto de carga inalámbrica	Transferencia inductiva simultánea	Posibilidad de carga sin contacto para múltiples dispositivos	Ausencia de mecanismos de alineación entre bobinas
[4]	Prototipo de carga inalámbrica para vehículos eléctricos	Resonancia electromagnética	Alta eficiencia bajo condiciones ideales de alineación	Pérdidas energéticas por desalineación y separación excesiva
[2]	Diseño de helipuerto autónomo para UAVs	Sensores de posición y procesamiento de imágenes	Aterrizaje autónomo y con alta precisión	No integra sistemas de recarga energética
[9]	Plataforma de aterrizaje autónomo asistida por visión artificial	YOLOv8 y detección de marcadores QR	Alta precisión en la identificación de la plataforma	No aborda la transferencia de energía

Ref.	Enfoque estudio	del	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[8]	Identificación visual de plataformas de aterrizaje	de	Análisis de color, forma y distancia	Detección robusta bajo distintas condiciones de iluminación	No integra recarga inalámbrica ni centrado automático
[13]	Algoritmos de visión artificial aplicados a UAVs agrícolas	de	Procesamiento visual y navegación asistida	Mejora en la eficiencia del aterrizaje y recopilación de datos	Dependencia de condiciones ambientales
[14]	Plataforma física de recarga para UAVs	física para	Diseño estructural de base de aterrizaje	Aporte conceptual al diseño de estaciones de recarga	Falta de análisis experimental de alineación inductiva
[15]	Diseño de plataforma de despegue y aterrizaje para UAVs	de	Configuración de mecánica y estructural	Mejora de la estabilidad estructural	No aborda transferencia de energía ni desalineación
[16]	Análisis de propuestas de carga inductiva para UAVs	de	Modelado de transferencia de energía	Evaluación teórica de la viabilidad de la carga inalámbrica	Estudios centrados en simulación sin validación física
[5]	Sistema integrado de aterrizaje y recarga inalámbrica para UAVs	de	Visión computacional, control activo y carga inductiva	Integración funcional completa con alta precisión de alineación	Alta complejidad del sistema y requerimientos computacionales elevados
[6]	Plataforma autónoma de aterrizaje con alineación asistida	de	Sensores, control activo y transferencia inductiva	Mejora del acoplamiento energético durante la recarga	Arquitectura compleja y costos de implementación

Ref.	Enfoque estudio	del	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[7]	Estación inteligente de recarga inalámbrica para UAVs		Control avanzado y acoplamiento inductivo	Alta eficiencia energética en condiciones controladas	Enfoque orientado a sistemas especializados y de mayor escala

METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental y de desarrollo tecnológico aplicado, con el objetivo de diseñar, fabricar e integrar una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo para un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), así como evaluar su desempeño energético y viabilidad operativa. El procedimiento metodológico se estructuró en etapas interrelacionadas, las cuales se describen a continuación y se resumen esquemáticamente en la Figura 1.

1. Identificación del problema y enfoque de estudio. En correspondencia con el objetivo general y el objetivo específico 1, el proceso inició con la identificación del problema de investigación, centrado en la limitada autonomía de los VANTs comerciales debido a los tiempos de recarga y la dependencia del operador. Se realizó una revisión bibliográfica sistemática de literatura académica, tesis e informes técnicos publicados entre 2020 y 2025, con el fin de identificar soluciones existentes de carga inductiva, aterrizaje asistido y acoplamiento magnético, así como delimitar el enfoque del presente estudio hacia mecanismos pasivos de alineación final.

2. Selección de materiales y componentes. Para el cumplimiento del objetivo específico 1, se seleccionaron materiales y componentes compatibles con un VANT comercial ligero. La plataforma de aterrizaje fue fabricada mediante impresión 3D utilizando material PLA, mientras que el sistema de carga inductiva estuvo conformado por un módulo tipo MagSafe, integrado por un transmisor y un receptor inductivo. Se emplearon imanes circulares para implementar el mecanismo pasivo de acoplamiento magnético, así como una fuente de alimentación regulada, cableado y elementos de fijación. Para la instrumentación experimental se utilizaron un multímetro digital, un cronómetro y el software de monitoreo del dron.

3. Diseño mecánico y modelado 3D del prototipo. En concordancia con el objetivo específico 1, el diseño estructural de la plataforma se desarrolló mediante un proceso de ingeniería inversa, tomando mediciones directas del área de aterrizaje del dron para asegurar compatibilidad geométrica.

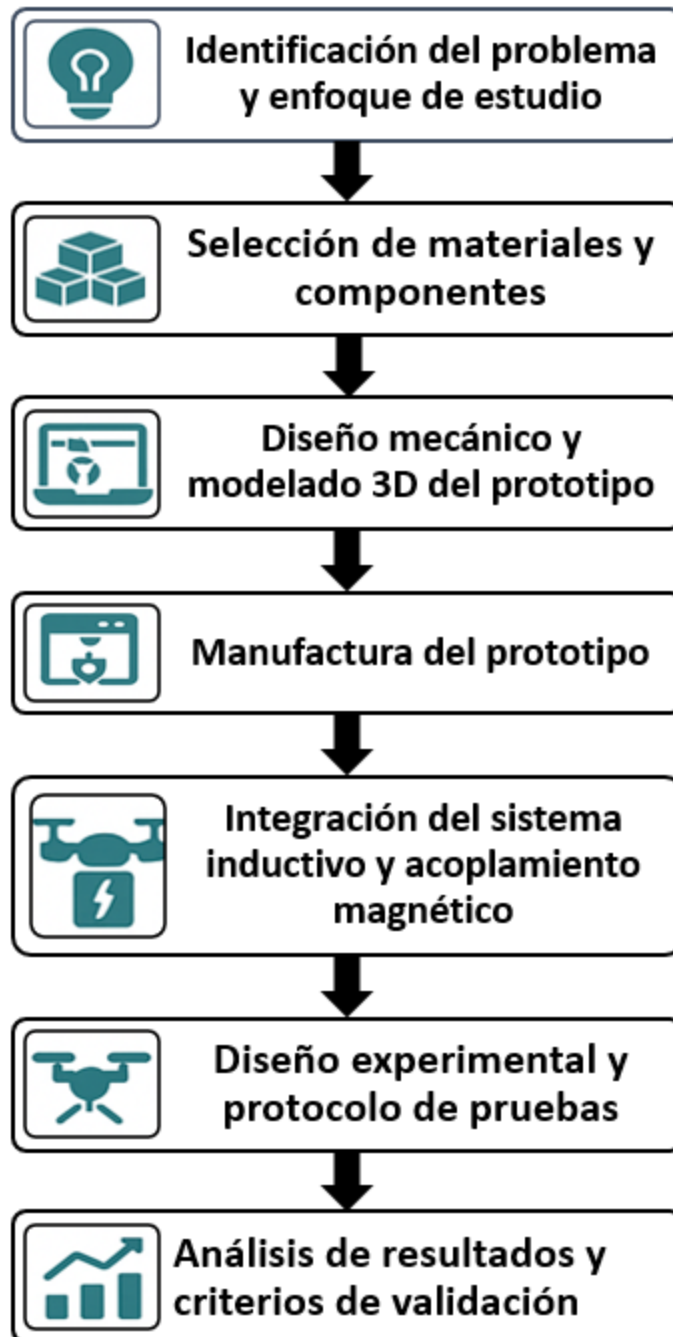


FIGURA 1. Metodología. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó el modelado tridimensional de la base, el soporte de bobinas y el alojamiento de imanes utilizando Autodesk Fusion 360, optimizando la geometría para garantizar estabilidad durante el aterrizaje y una adecuada alineación entre las bobinas inductivas.

4. Manufactura del prototipo. El prototipo físico fue fabricado mediante impresión 3D utilizando una impresora Bambu Lab A1 y filamento PLA de 1.75 mm. Los parámetros de manufactura empleados se detallan en la Tabla 2 y fueron seleccionados con el fin de garantizar resistencia mecánica, estabilidad dimensional y repetibilidad del proceso. En la Figura 2 se muestran los componentes impresos que conforman la plataforma de aterrizaje.

Tabla 2. *Parámetros de impresión 3D empleados en la fabricación del prototipo.*

Parámetro	Valor
Impresora utilizada	Bambu Lab A1
Software de corte	Bambu Studio
Material	PLA, 1.75 mm
Altura de capa	0.20 mm
Altura de primera capa	0.20 mm
Perímetros	2
Capas superiores	5
Capas inferiores	3
Patrón de relleno	Rectilíneo
Densidad de relleno	15 %
Tipo de soporte	Árbol (automático)
Ángulo de generación de soporte	30°
Adhesión a la cama	Balsa automática

5. Integración del sistema inductivo y acoplamiento magnético. Para atender el objetivo específico 3, el sistema de carga inductiva fue integrado en la plataforma, fijando el transmisor en la base y el receptor en la parte inferior del dron. Se dispusieron imanes circulares alrededor de ambas bobinas para implementar el mecanismo pasivo de centrado magnético, inspirado en sistemas tipo MagSafe. Este mecanismo permite corregir desalineaciones residuales durante la fase final del aterrizaje, sin recurrir a actuadores o sistemas de control activo. Previo a las pruebas de vuelo, se verificaron las polaridades, el aislamiento eléctrico y la estabilidad de corriente, evaluando el sistema tanto en vacío como bajo carga.

6. Diseño experimental y protocolo de pruebas. En correspondencia con los objetivos específicos 2, 3 y 4, se definió un protocolo experimental para evaluar el desempeño del sistema propuesto. Las pruebas se realizaron en condiciones interiores para minimizar interferencias ambientales y consistieron en tres tipos de vuelo: vuelo mixto limitado (VLM), vuelo agresivo (VA) y vuelo de ascenso/descenso (VAD).

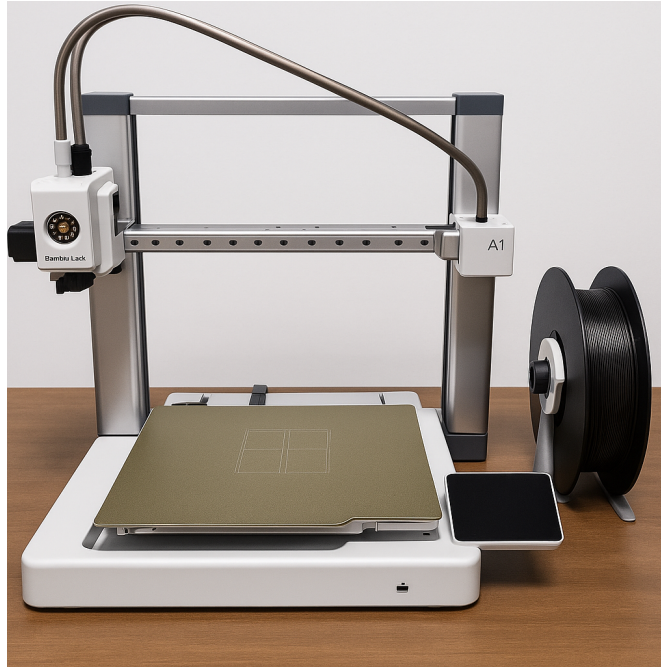


FIGURA 2. *Impresora 3D Bambu Lab A1 utilizada para la manufactura del prototipo. Fuente: Elaboración propia.*

Para cada tipo de vuelo se realizaron tres repeticiones, registrando el tiempo de autonomía, la estabilidad del aterrizaje y la efectividad del centrado magnético. La eficiencia del sistema de carga inductiva se evaluó comparando el tiempo total de recarga y la potencia transferida frente a un método convencional, definido como la recarga del VANT mediante conexión directa por cable. La eficiencia de transferencia energética se calculó mediante la Ec. (1):

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (1)$$

Donde P_{salida} corresponde a la potencia recibida por el dron y P_{entrada} a la potencia suministrada por el transmisor. Adicionalmente, se monitoreó el comportamiento térmico del sistema, verificando que el incremento de temperatura se mantuviera por debajo de 5 °C.

7. Análisis de resultados y criterios de validación. Los datos experimentales obtenidos se procesaron mediante análisis descriptivo, calculando promedios y variaciones para cada condición de prueba. Los criterios de validación del prototipo incluyeron: estabilidad del aterrizaje con acoplamiento magnético, eficiencia de transferencia energética, tiempo de recarga en comparación con el método convencional, efecto del peso añadido en la autonomía del dron y comportamiento térmico del sistema. Los resultados

fueron interpretados en términos de la viabilidad técnica y la aplicabilidad del sistema propuesto en VANTs comerciales ligeros. Aunque el sistema fue evaluado en un único modelo de VANT, el objetivo del estudio se centra en la validación funcional del mecanismo pasivo de centrado, independientemente del modelo específico.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización dimensional del sistema inductivo

Durante la etapa inicial se realizó la caracterización dimensional del módulo de carga inductiva tipo MagSafe y de su receptor, con el propósito de garantizar la correcta adaptación del diseño digital a los componentes físicos reales. Mediante el uso de un calibrador Vernier digital se midieron diámetros, espesores, alturas y tolerancias críticas del módulo transmisor, como se muestra en la Figura 3. Las dimensiones obtenidas permitieron ajustar con precisión el modelo tridimensional antes del proceso de manufactura, asegurando la compatibilidad geométrica entre el sistema inductivo, la plataforma de aterrizaje y el VANT, y reduciendo errores durante la integración mecánica.

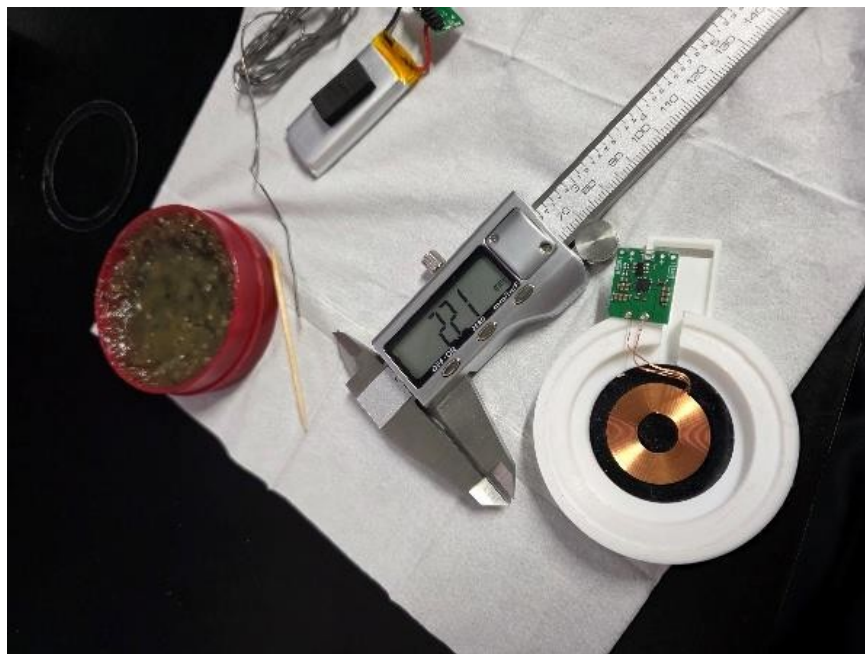


FIGURA 3. *Medición del módulo transmisor inductivo mediante calibrador Vernier digital durante la fase de ingeniería inversa. Fuente: Elaboración propia.*

Modelado 3D de la plataforma y validación del ensamble digital

Con base en las dimensiones caracterizadas, se desarrolló el modelo tridimensional de la plataforma de aterrizaje en Autodesk Fusion 360. El diseño incluyó el alojamiento de la bobina transmisora,

las cavidades para los imanes de centrado magnético, la estructura base del sistema y la geometría de acoplamiento con el dron. El ensamble digital completo, presentado en la Figura 4, confirmó la compatibilidad entre los componentes reales y el diseño propuesto, verificando la alineación entre las bobinas y la ausencia de interferencias estructurales, lo que validó el modelo previo a la fabricación física.

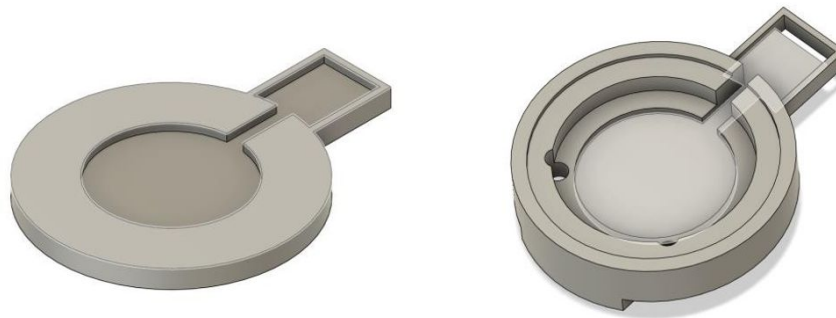


FIGURA 4. *Modelo 3D de la plataforma con alojamiento para bobina e imanes desarrollado en Fusion 360. Fuente: Elaboración propia.*

Fabricación del prototipo mediante impresión 3D

Una vez validado el diseño, las piezas de la plataforma fueron fabricadas mediante impresión 3D utilizando una impresora Bambu Lab A1 y material PLA, seleccionado por su bajo peso, rigidez y estabilidad dimensional. La Figura 5 muestra la comparación entre el modelo digital y el prototipo físico obtenido. El peso total de la estructura impresa fue de 33.9 g, valor que se mantiene dentro de los límites de carga admisibles del VANT, garantizando que la plataforma no compromete la maniobrabilidad ni la autonomía del sistema durante el vuelo.

Integración funcional del sistema inductivo en el VANT

Posteriormente, se realizó la integración eléctrica y mecánica del módulo receptor inductivo en el compartimento de la batería del dron. El receptor fue conectado al sistema de alimentación del VANT, asegurado físicamente mediante material amortiguante y alineado de forma precisa para garantizar su compatibilidad con la carcasa y el chasis. La Figura 6 presenta el proceso de integración del receptor, mostrando la conexión eléctrica, la alineación interna y el ensamble final previo a la validación funcional. Las pruebas confirmaron que el sistema integrado no interfiere con los sensores, el tren de aterrizaje ni la estructura del dron.



FIGURA 5. *Modelo 3D y prototipo físico de la plataforma fabricado mediante impresión 3D con material PLA. Fuente: Elaboración propia.*

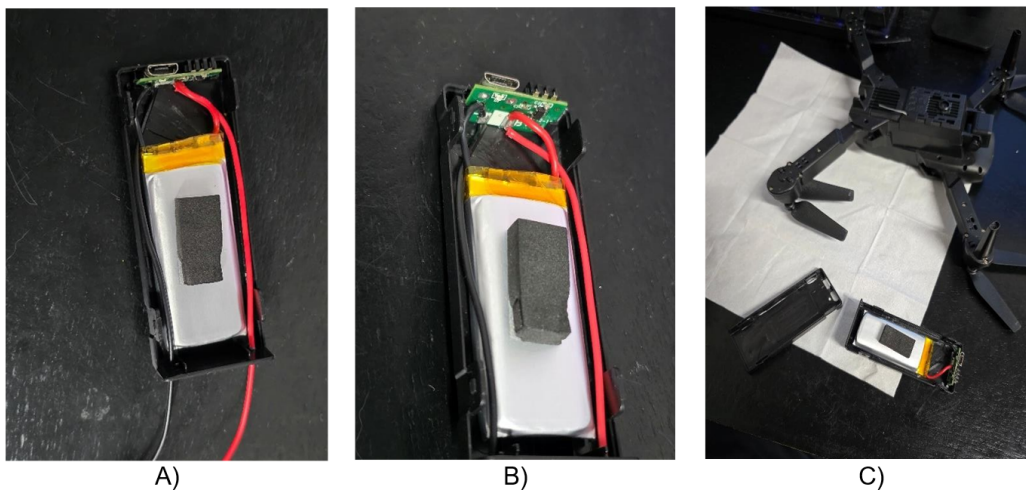


FIGURA 6. *Integración del módulo de carga inalámbrica en la batería del dron. A) Conexión del módulo receptor al sistema de alimentación. B) Alineación del módulo en la carcasa de soporte. C) Ensamble del módulo con la estructura del VANT previo a la validación funcional. Fuente: Elaboración propia.*

Integración del sistema inductivo y acoplamiento magnético

El sistema de carga inductiva fue integrado mediante la instalación de la bobina transmisora en la plataforma y la bobina receptora en la parte inferior del dron. Alrededor de ambas bobinas se colocaron imanes circulares, conformando un mecanismo de acoplamiento magnético tipo MagSafe. Este sistema permitió corregir desviaciones laterales durante el aterrizaje y facilitar el centrado automático entre transmisor y receptor. La Figura 7 muestra la distribución de los imanes y el ensamble del sistema inductivo, evidenciando una alineación adecuada para la transferencia energética.

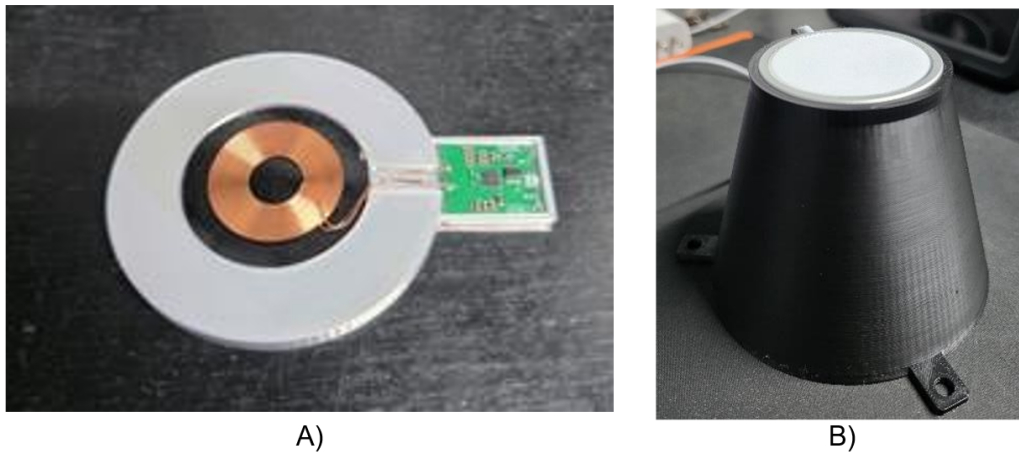


FIGURA 7. A) Integración del sistema de carga inductiva y B) Distribución de imanes para centrado automático. Fuente: Elaboración propia.

Ensamble final del sistema dron–plataforma

Una vez completada la integración eléctrica y mecánica, se realizó el ensamble final del sistema para evaluar el ajuste dinámico entre el dron y la plataforma de aterrizaje. La Figura 8 muestra el dron con el receptor inductivo instalado y la plataforma equipada con el transmisor. La verificación confirmó que la plataforma no genera interferencias mecánicas ni afecta la estabilidad del dron durante las maniobras de aproximación, aterrizaje y permanencia sobre la base.

Pruebas de recarga y desempeño energético

Se realizaron pruebas experimentales de recarga para evaluar el desempeño energético del sistema inductivo. Durante estas pruebas se verificó el centrado magnético, la alineación entre bobinas, el inicio efectivo de la transferencia de energía y la estabilidad del dron durante el proceso. La Figura 9 muestra el proceso de recarga inalámbrica, evidenciando una alineación estable y sujeción adecuada. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- **Tiempo de recarga convencional:** 1 h 10 min

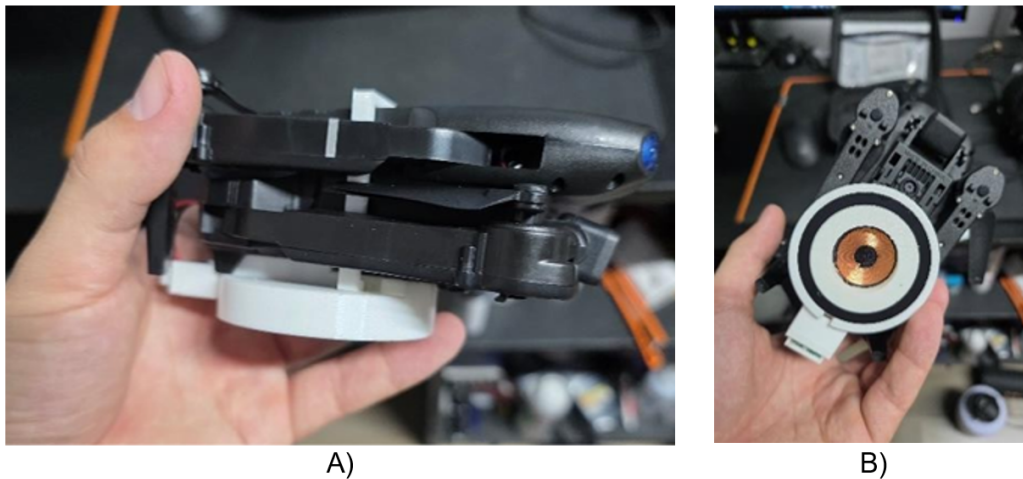


FIGURA 8. *Ensamble final del dron A) con el receptor inductivo y B) la plataforma con el transmisor.*
Fuente: Elaboración propia.

- **Tiempo de recarga por inducción:** 1 h 00 min
- **Reducción total del tiempo:** 15 %

Adicionalmente, el monitoreo térmico registró incrementos inferiores a 5°C , manteniéndose dentro de rangos seguros de operación.

Evaluación de autonomía y estabilidad en vuelo

Para analizar el impacto del peso adicional del sistema inductivo ($\approx 40\text{ g}$), se realizaron pruebas de vuelo bajo diferentes condiciones operativas. La Figura 10 muestra evaluaciones de vuelo estacionario, maniobras en entorno exterior con viento y la fase de aproximación previa al aterrizaje. El dron mantuvo un comportamiento estable, sin vibraciones adicionales ni pérdida de control. La autonomía promedio registrada fue de 5 min 30 s, con variaciones menores ($\pm 10\text{ s}$) dependiendo del tipo de maniobra. La estabilidad se evaluó mediante observación operacional y tiempo de vuelo, no mediante telemetría avanzada.

Con el fin de complementar esta evaluación, se analizaron tres modalidades de vuelo: vuelo mixto, vuelo agresivo y ciclo único de ascenso/descenso. La Tabla 3 resume los valores promedio de autonomía obtenidos, confirmando que el sistema integrado no genera una degradación significativa del desempeño energético del VANT.

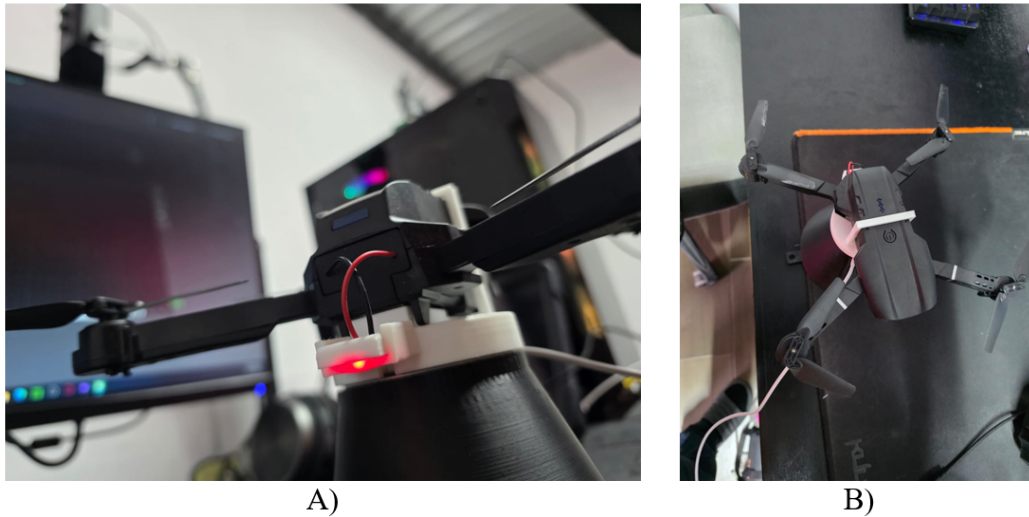


FIGURA 9. *Proceso de recarga inalámbrica del VANT sobre la plataforma de carga inductiva. A) Activación del sistema transmisor y detección del receptor. B) Alineación final entre bobinas y validación del acoplamiento magnético. Fuente: Elaboración propia.*

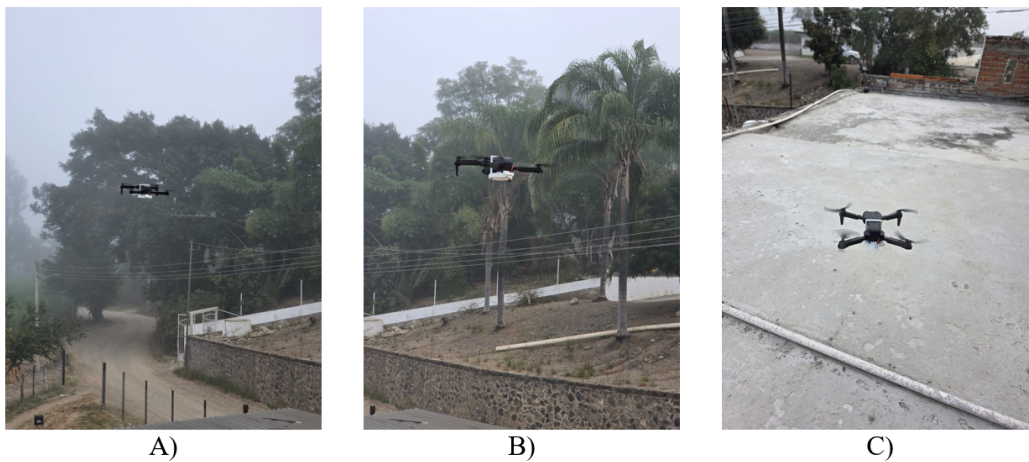


FIGURA 10. *Evaluación de estabilidad en vuelo del VANT con el sistema inductivo integrado. A) Vuelo estacionario con neblina. B) Prueba en entorno exterior con presencia de viento. C) Aproximación previa al aterrizaje. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 3. Resultados obtenidos de pruebas de vuelo.

Tipo de vuelo	Condiciones operativas	Autonomía promedio (min)	Observaciones
Vuelo mixto	Ascensos, descensos y desplazamientos combinados.	5–6	Autonomía estable; ligera reducción por variabilidad en consumo.
Vuelo agresivo	Maniobras rápidas, cambios bruscos de dirección y aceleración sostenida.	4–5	Mayor demanda energética; disminución esperada de autonomía.
Ascenso/descenso único	Ascenso continuo a altura máxima seguido de descenso controlado.	5–6	Comportamiento estable; sin pérdida de control ni oscilaciones.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten analizar de manera integral la viabilidad técnica de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo para Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), contrastando su desempeño con los enfoques reportados en la literatura reciente. En particular, el sistema desarrollado aborda uno de los problemas más recurrentes en la recarga inalámbrica de UAVs: la desalineación entre bobinas durante la fase final de aterrizaje, la cual ha sido ampliamente identificada como un factor crítico de pérdida de eficiencia energética [4]. El mecanismo de acoplamiento magnético tipo MagSafe implementado en la plataforma demostró ser un elemento clave para corregir desviaciones laterales y favorecer el centrado automático del dron sobre la estación de carga. A diferencia de los sistemas que dependen de control activo, sensores adicionales o visión computacional para garantizar la alineación [5], [6], el enfoque pasivo propuesto logra mejorar el acoplamiento inductivo sin incrementar la complejidad del sistema ni los requerimientos computacionales. Este resultado es relevante, ya que responde a la necesidad de soluciones simples, robustas y de bajo costo para drones comerciales de pequeña y mediana escala.

En comparación con otras estrategias de autonomía energética, como el intercambio automático de baterías [1] o las estaciones de recarga basadas en energía renovable [12], el prototipo desarrollado presenta ventajas en términos de simplicidad mecánica, menor mantenimiento y reducción de puntos de fallo asociados a elementos móviles. Si bien algunos sistemas especializados reportan tiempos de recarga menores mediante arquitecturas de alta potencia, los resultados obtenidos en este estudio muestran una reducción del 15 % en el tiempo total de recarga respecto al método convencional, manteniéndose dentro

de límites estructurales y energéticos compatibles con UAVs comerciales compactos. Esta mejora se atribuye principalmente al centrado magnético y a la alineación óptima entre bobinas durante el proceso de recarga.

El desempeño en vuelo del dron con el sistema inductivo integrado evidenció que el peso adicional del conjunto (aproximadamente 40 g) no afecta de manera significativa la estabilidad ni la maniobrabilidad del VANT. Incluso bajo condiciones ambientales adversas, como presencia de neblina y viento moderado, el dron mantuvo un comportamiento estable, sin vibraciones ni pérdidas de control. Este resultado coincide con lo reportado en estudios donde la integración de módulos adicionales no compromete el desempeño dinámico cuando existe una adecuada distribución de masa [8], [13], y confirma la solidez del diseño estructural propuesto.

Para consolidar el análisis del desempeño global del sistema, la Tabla 4 sintetiza los principales indicadores estructurales, energéticos y térmicos obtenidos durante las pruebas experimentales. Los valores reportados evidencian un equilibrio adecuado entre eficiencia de transferencia energética, estabilidad operativa y seguridad térmica. En particular, la eficiencia de carga alcanzada (85 %) confirma una transferencia inductiva estable bajo condiciones reales de operación, mientras que la variación térmica inferior a 5 °C valida la operación segura del sistema durante ciclos prolongados de recarga. Asimismo, la autonomía promedio registrada (5 min 30 s) indica que la incorporación del sistema no genera degradación observable en el tiempo de vuelo del dron.

En conjunto, los resultados discutidos posicionan al sistema desarrollado como una alternativa viable y técnicamente sólida para la automatización del proceso de recarga de VANTs. A diferencia de enfoques que abordan de forma aislada el aterrizaje autónomo, la recarga inalámbrica o el diseño estructural de plataformas [2], [8]– [15], la presente investigación integra estos elementos en un prototipo funcional validado experimentalmente. No obstante, se reconocen limitaciones que abren líneas futuras de investigación, como la incorporación de visión computacional para un aterrizaje completamente autónomo, la evaluación de la degradación del sistema inductivo a largo plazo y la exploración de materiales con menores pérdidas electromagnéticas. Aún así, el enfoque pasivo de centrado magnético propuesto demuestra un alto potencial para aplicaciones donde la continuidad operativa, la simplicidad y la robustez son factores prioritarios.

CONCLUSIONES

El desarrollo y validación experimental de la plataforma de aterrizaje con carga inalámbrica por inducción y acoplamiento magnético permitió demostrar la viabilidad técnica de un sistema pasivo, ligero y de bajo costo, orientado a mejorar la eficiencia del proceso de recarga energética en Vehículos Aéreos No Tripulados comerciales. Los resultados obtenidos confirman que la incorporación de un mecanismo de

Tabla 4. *Indicadores globales de desempeño del prototipo.*

Parámetro evaluado	Resultado obtenido	Interpretación técnica
Peso total del sistema	40 g	No compromete la autonomía ni estabilidad del dron.
Eficiencia de carga	85 %	Transferencia energética estable mediante resonancia inductiva.
Tiempo total de recarga (medido)	1 h $\pm$ 3 min	Reducción del 15 % respecto al método convencional (1 h 10 min), atribuible al centrado magnético y alineación óptima entre bobinas.
Autonomía del dron (medida)	5 min 30 s (promedio)	Se mantiene la autonomía nominal; el sistema añadido no genera degradación observable.
Estabilidad estructural	Alta	La base tipo “Búnker Cónico” asegura inmovilidad durante el acoplamiento y recarga.
Variación térmica	< 5 °C	El sistema opera dentro de límites térmicos seguros durante ciclos de carga prolongados.

centrado magnético tipo MagSafe contribuye de manera efectiva a corregir desalineaciones residuales entre las bobinas transmisora y receptora durante la fase final del aterrizaje, uno de los principales factores que afectan la eficiencia de la transferencia inductiva.

Las pruebas experimentales mostraron que el sistema desarrollado permitió reducir en aproximadamente un 15 % el tiempo total de recarga en comparación con el método convencional de carga cableada, manteniendo una eficiencia promedio del 85 % y variaciones térmicas inferiores a 5 °C, lo cual evidencia un funcionamiento estable y seguro del sistema inductivo. Asimismo, la integración del sistema no afectó de manera significativa el desempeño dinámico del VANT; el peso adicional aproximado de 40 g no comprometió la estabilidad, la maniobrabilidad ni la autonomía de vuelo, la cual se mantuvo en un promedio de 5 min 30 s bajo diferentes modalidades operativas.

Si bien el sistema no incorpora algoritmos de visión computacional ni navegación autónoma para la localización activa de la plataforma, los resultados obtenidos validan el valor del acoplamiento magnético pasivo como una solución eficaz para mejorar la alineación final entre bobinas una vez que el dron ha aterrizado sobre la base. Este enfoque representa una alternativa práctica frente a sistemas activos más complejos, al reducir la necesidad de actuadores adicionales, procesamiento intensivo y costos de implementación.

Las principales limitaciones del estudio se relacionan con la validación experimental realizada sobre un único modelo de dron comercial y con la ausencia de mediciones avanzadas de telemetría durante las pruebas de vuelo. En trabajos futuros se recomienda evaluar el desempeño del sistema en distintos modelos de VANTs, integrar métricas cuantitativas de consumo energético y respuesta dinámica, así como explorar la incorporación de sistemas de guiado autónomo que complementen el centrado pasivo propuesto.

En conjunto, el prototipo desarrollado constituye una solución técnicamente viable y replicable para estaciones de recarga inalámbrica de UAVs, especialmente en aplicaciones donde se priorizan la simplicidad, la robustez operativa y el bajo costo, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones en sistemas autónomos de recarga y operación continua de drones.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

E. D. Casillas-Parbol: Investigación, Conceptualización, Desarrollo del software, Diseño metodológico, Validación experimental y Elaboración de materiales gráficos. **J. A. Cárdenas-Magaña:** Curación de datos, Redacción del manuscrito (versión preliminar), Revisión, Edición y Adecuación del artículo para formato de publicación.

REFERENCIAS

- [1] J. Albert, V. Tuesta, L. Ángel, and V. Mellado, “Sistema mecatrónico automático para intercambio de baterías en una plataforma de aterrizaje para drones de tipo multirotor,” Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021. [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/items/9eda02db-becd-44f4-be38-657a98cd02e8>
- [2] M. Z. Zúñiga Motato, “Diseño de un helipuerto para protección y carga automática de un dron,” Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Occidente, 2025. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/99939719-a02e-473c-b555-cabbd45b9485/content>
- [3] D. H. Muñoz Quinto, “Implementación de un sistema multipunto de carga inalámbrica utilizando el método inductivo en la UTEQ,” Tesis, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/e2242cd4-981d-4b3b-931d-03caaec7ecbc>
- [4] A. Martínez, C. González, and A. Von Chong, “Prototipo inalámbrico para carga de vehículos,” in *APANAC Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología*, 2021, pp. 457–463. DOI: [10.33412/apanac.2021.3221](https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3221). [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3221>
- [5] A. B. Junaid, A. Konoiko, Y. Zweiri, M. N. Sahinkaya, and L. Seneviratne, “Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles,” *Energies*, vol. 10, no. 6, p. 803, 2017. DOI: [10.3390/en10060803](https://doi.org/10.3390/en10060803)
- [6] A. Rohan, M. Rabah, M. Talha, and S.-H. Kim, “Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm,” *Applied System Innovation*, vol. 1, no. 4, p. 44, 2018. DOI: [10.3390/asi1040044](https://doi.org/10.3390/asi1040044)
- [7] C. H. Choi, H. J. Jang, S. G. Lim, H. C. Lim, S. H. Cho, and I. Gaponov, “Automatic wireless drone charging station creating essential environment for continuous drone operation,” in *Proc. 2016 Int. Conf. Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Ansan, South Korea, 2016, pp. 132–136. DOI: [10.1109/ICCAIS.2016.7822448](https://doi.org/10.1109/ICCAIS.2016.7822448)
- [8] C. Gómez Redondo, “Reconocimiento de una plataforma para aterrizaje de drones mediante técnicas de visión por computación,” Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense de Madrid, 2020. [Online]. Available: <https://docta.ucm.es/entities/publication/a4554a5a-d51b-42d8-b56b-d4b78a82e801>
- [9] A. Daniel, M. Pacheco, J. Manuel, R. Arreguin, J. M. Carranza, J. Carlos, P. Ortega, and S. T. Arriaga, “Sistema autónomo de aterrizaje para micro vehículos aéreos basado en YOLOv8

- (YOLOv8-based autonomous landing system for micro aerial vehicles),” *Pistas Educativas*, vol. 46, no. 149, 2025. [Online]. Available: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3717>
- [10] Y. Liu, B. Zhang, and Z. Zeng, “High-efficiency wireless charging system for UAVs based on PT-symmetric principle,” *Drones and Autonomous Vehicles*, vol. 2, p. 10008, 2025. DOI: [10.70322/dav.2025.10008](https://doi.org/10.70322/dav.2025.10008)
- [11] A. Ağçal and T. H. Doğan, “A novel folding wireless charging station design for drones,” *Drones*, vol. 8, no. 7, p. 289, Jun. 2024. DOI: [10.3390/drones8070289](https://doi.org/10.3390/drones8070289)
- [12] S. L. Fernandez Concha, “Prototipo de una estación de carga eléctrica múltiple empleando energías renovables para la optimización del tiempo de uso de drones agrícolas en la detección de plagas,” Tesis, Universidad Tecnológica del Perú, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/11507/S.Fernandez_Tesis_Titulo_Profesional_2024.pdf
- [13] J. Santiago, E. P. Cabrera, and E. A. Tigre, “Diseño e implementación de algoritmos de visión artificial aplicados en vehículos aéreos no tripulados para aterrizaje autónomo: Caso de estudio en agricultura de precisión,” Universidad de Cuenca, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/dbd3614c-24c4-4f9e-8491-29dcf3fab65>
- [14] E. Moral Ursúa, “Diseño y construcción de una plataforma de recarga para UAV,” Trabajo de fin de grado, Universidad Pública de Navarra, 2020. [Online]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/entities/publication/162b3870-c7c9-407b-9ff6-daf214cd6b0a>
- [15] P. Mendióroz Beaumont, “Diseño, construcción y configuración de un copter y de un rover con plataforma de despegue y aterrizaje,” Trabajo de fin de grado, Universidad Pública de Navarra, 2022. [Online]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/entities/publication/729e89b3-fcd2-4a93-a4b3-1fe205533c2b>
- [16] N. V. Carmona, “Estudio de carga inalámbrica en vehículos,” Trabajo de Fin de Grado, 2023. [Online]. Available: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/d6622bfe-eeeb-48f8-a098-97bef396bf9c/content>