



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA TELEMETRIZADO DE CARGA INALÁMBRICA UTILIZANDO
TECNOLOGÍA INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS (UAV) EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero/a en Telecomunicaciones

ÁREA: Área de Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la información y sistemas de
control

AUTOR: Evelyn Fernanda Saltos Pilliza

Kevin Jair Sandoval Jaramillo

TUTOR: Ing. Geovanni Danilo Brito Moncayo, Mg.

Ambato - Ecuador

agosto – 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA TELEMETRIZADO DE CARGA INALÁMBRICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por la señorita Evelyn Fernanda Saltos Pilliza y el señor Kevin Jair Sandoval Jaramillo, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que los estudiantes han sido tutorados durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, agosto 2024.

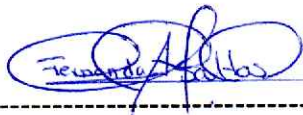
Ing. Geovanni Danilo Brito Moncayo, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA TELEMETRIZADO DE CARGA INALÁMBRICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Ambato, agosto 2024.



Evelyn Fernanda Saltos Pilliza

C.C. 1805394119

AUTOR



Kevin Jair Sandoval Jaramillo

C.C. 1104905615

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedemos todos los derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizamos su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, agosto 2024.



Evelyn Fernanda Saltos Pilliza

C.C. 1805394119

AUTOR



Kevin Jair Sandoval Jaramillo

C.C. 1104905615

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por la señorita Evelyn Fernanda Saltos Pilliza y el señor Kevin Jair Sandoval Jaramillo, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA TELEMETRIZADO DE CARGA INALÁMBRICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidente del Tribunal.

Ambato, agosto 2024.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Franklin Wilfrido Salazar Logroño, Mg

PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg

PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional y por ser mi mayor inspiración. Gracias por su apoyo, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi hermana, por ser mi compañera de vida y por estar siempre a mi lado celebrando mis logros y brindándome su apoyo en momentos difíciles.

Y de manera muy especial a Kevin, por su colaboración, esfuerzo y dedicación. Gracias por compartir este viaje académico conmigo, por las largas horas de trabajo en equipo, y por tu amistad incondicional.

Fer

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme brindado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para completar este largo viaje.

Quiero extender mi gratitud más sincera a mis padres, quienes siempre han estado ahí para apoyarme, alentarme y motivarme en cada paso de este camino. Su amor incondicional y sacrificio han sido mi mayor inspiración.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi tutor, Ing. Geovanni Brito por su invaluable orientación y apoyo constante a lo largo de todo este proceso.

Al grupo de ingenieros de los Talleres Tecnológicos de la FISEI, por brindarme el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su apoyo y colaboración han sido esenciales para la culminación de este proyecto.

Por último, quiero extender mi gratitud a todas las personas que han estado presentes en este camino. A mis familiares y amigos por su apoyo y cariño.

¡Gracias a todos por creer en mí y por ayudarme a hacer realidad este sueño!

Fer

DEDICATORIA

A mis padres, por el amor, la motivación y por ser los pilares fundamentales en mi formación personal, profesional y en la construcción del camino al cumplimiento de mis sueños.

A mis queridos hermanos, por su presencia, por los consejos y por ser la luz que ilumina mi camino, permitiéndome vislumbrar cada uno de mis objetivos incluso en los momentos más difíciles.

A Fernanda, por formar parte de este camino desde el punto de partida de mi formación profesional, por el constante apoyo y el ánimo inquebrantable.

Kevin

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme fortaleza, perseverancia, paciencia y responsabilidad para alcanzar cada uno de mis objetivos.

A mis padres por hacer que los límites solo sean el punto de partida y no barreras insuperables. Por el apoyo, el amor, el esfuerzo y por ser los guías principales para completar este largo camino.

Manifiesto mi gratitud al Ing. Geovanni Brito por su amistad, colaboración y tutoría en el desarrollo de este trabajo.

A los ingenieros de los Talleres Tecnológicos de la FISEI, por brindar apoyo, ideas, espacio y recursos en el desarrollo del trabajo de investigación. Gracias por su colaboración.

A mis hermanos, familiares y compañeros que formaron parte de este largo camino.

¡Gracias a todos por la confianza puesta en mí!

Kevin

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xxi
RESUMEN EJECUTIVO	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	2
1.3 Fundamentación teórica	5

1.3.1 Vehículos aéreos no tripulados (UAV's)	5
1.3.2 Técnicas de carga de baterías para UAV's	8
1.3.3 Wireless Power Transfer (WPT).....	10
1.3.4 Inductive Power Transfer	15
1.3.5 Telemetría	24
1.3.6 Protocolos de comunicación	28
1.3.7 Servidos LAMP.....	31
1.4 Objetivos	32
1.4.1 Objetivo general	32
1.4.2 Objetivos específicos	32
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	33
2.1 Materiales	33
2.2 Métodos.....	35
2.2.1 Modalidad de la investigación	35
2.2.2 Recolección de información.....	36
2.2.3 Procesamiento y análisis de datos	37
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
3.1 Desarrollo de la propuesta.....	38
3.1.1 Descripción de los UAV's	38
3.1.2 Características Técnicas de los UAV's	38
3.1.3 Sistema de carga tradicional	39

3.1.4 Problemas identificados con el sistema de carga tradicional	41
3.1.5 Esquema general del sistema	41
3.1.6 Selección de los elementos de hardware para el sistema telemetrizado de carga inalámbrica	43
3.1.7 Software para el sistema telemetrizado de carga inalámbrica	51
3.1.8 Sistema de carga inalámbrica	52
3.1.9 Implementación del sistema de telemetría	59
3.1.10 Diseño de la estructura para la estación de carga	69
3.2 Montaje del sistema telemetrizado de carga inalámbrica	73
3.2.1 Montaje de la estación de carga con telemetría	73
3.2.2 Montaje del circuito de conmutación y telemetría en el UAV	74
3.2.3 Automatización del sistema	78
3.2.4 Sistema inteligente de carga inalámbrica	80
3.3 Resultados	81
3.3.1 Experimentación con bobinas	81
3.3.2 Medición en el osciloscopio	85
3.3.3 Tolerancia a desalineamientos	88
3.3.4 Campo magnético y distancia de transferencia de potencia	89
3.3.5 Coeficiente de acoplamiento	90
3.3.6 Pérdidas del sistema	91
3.3.7 Telemetría	92

3.3.8 Consumo de la estación de carga	94
3.4 Presupuesto	96
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
4.1 Conclusiones	98
4.2 Recomendaciones.....	99
ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de UAV's por número de rotores	6
Tabla 2. Comparación de distintos tipos de batería para UAV	8
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la WPT	11
Tabla 4. Comparativa de los métodos de campo lejano y cercano	14
Tabla 5. Comparación de las cuatro topologías básicas.....	19
Tabla 6. Diferentes estándares para aplicaciones IPT.....	20
Tabla 7. Materiales para la carga inalámbrica	33
Tabla 8. Materiales para la sensorización	34
Tabla 9. Materiales para la comunicación.....	34
Tabla 10. Materiales adicionales.....	34
Tabla 11. Softwares.....	35
Tabla 12. Recolección de información.....	36
Tabla 13. Características Técnicas de los UAV's.....	39
Tabla 14. Sistema de carga tradicional	40
Tabla 15. Módulos de transmisión y recepción inalámbricos.....	44
Tabla 16. Tabla comparativa de los calibres 15,16 y 18.....	45
Tabla 17. Fuente de alimentación	45
Tabla 18. Balanceadores de carga en baterías LiPo	46
Tabla 19. Características del sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712	47
Tabla 20. Características del sensor de voltaje	47

Tabla 21. Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo.....	48
Tabla 22. Comparación entre módulos de comunicación	48
Tabla 23. Microcomputadoras	49
Tabla 24. Tabla comparativa de módulos de telemetría para UAV	50
Tabla 25. Parámetros para la carga de la batería LiPo	53
Tabla 26. Comparación del cable Litz y Cobre.....	58
Tabla 27. Tabla comparativa de los materiales para la construcción de la estación..	70
Tabla 28. Cobre - Cobre AWG 15	82
Tabla 29. Cobre - Cobre AWG 18	82
Tabla 30. Litz - Cobre AWG 15	82
Tabla 31. Litz - Litz AWG 15.....	82
Tabla 32. Cobre - Cobre AWG 15	83
Tabla 33. Cobre - Cobre AWG 18	83
Tabla 34. Litz - Cobre AWG 15	83
Tabla 35. Litz - Litz AWG 15.....	83
Tabla 36. Cobre - Cobre AWG 15	84
Tabla 37. Cobre - Cobre AWG 18	84
Tabla 38. Litz - Cobre AWG 15	84
Tabla 39. Litz - Litz AWG 15.....	84
Tabla 40. Datos de la señal del transmisor.....	87
Tabla 41. Datos de la señal del receptor	87

Tabla 42. Funcionamiento del sistema de carga con desalineamiento.....	88
Tabla 43 Datos de consumo de la estación	94
Tabla 44. Presupuesto	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. UAV de ala fija.....	6
Figura 2. Clasificación general de la WPT	10
Figura 3. Wireless Power Transfer (IPT).....	13
Figura 4. Wireless Power Transfer (CPT)	13
Figura 5. Circuito equivalente de dos inductores acoplados basado en el modelo T de un transformador	16
Figura 6. Varias configuraciones redes de compensación	18
Figura 7. Bobina circular plana.....	21
Figura 8. Bobina cuadrada	21
Figura 9. Bobina de doble D	22
Figura 10. a) Corriente parásita inducida por la auto - corriente b) Distribución de la corriente en el conductor.....	23
Figura 11. Telemetría en UAV	25
Figura 12. Sensores en UAV.....	26
Figura 13. Transmisión de datos del UAV.....	26
Figura 14. Estación de control en tierra	27
Figura 15. Software especializado (Grafana).....	28
Figura 16. Comunicación editor-suscriptor adoptado por el protocolo MQTT	29
Figura 17. Protocolo CoAP	30
Figura 18. Protocolo HTTP	30

Figura 19. Servidor LAMP	31
Figura 20. Carga tradicional del UAV	40
Figura 21. Esquema general del sistema	42
Figura 22. Módulo transmisor XKT-801	55
Figura 23. Esquemático del módulo transmisor XKT-801	55
Figura 24. Módulo receptor XKT-3170	57
Figura 25. Esquemático del módulo receptor XKT-3170	57
Figura 26. Servidor Apache activo	60
Figura 27. Servicio MySQL activo	60
Figura 28. Ventana login de phpMyAdmin	61
Figura 29. Configuración de la base de datos en MySQL	62
Figura 30. Servicio Mosquitto activo	62
Figura 31. Login de Grafana	63
Figura 32. Esquema de conexión de sensores con ESP32	64
Figura 33. Diagrama de flujo de programación en la estación de carga	65
Figura 34. Diagrama de secuencia para la adquisición de datos del UAV	66
Figura 35. Configuración de MySQL en Grafana	67
Figura 36. Configuración del protocolo MQTT en Grafana	67
Figura 37. Configuración para la presentación de datos en el dashboard	68
Figura 38. Interfaz de visualización final	68
Figura 39. Boceto de la estructura de la estación de carga	69

Figura 40. Caras del prisma en 3D para la estación de carga	69
Figura 41. Simulación en 3D de la estructura de la estación de carga.....	70
Figura 42. Pieza superior de la estación de carga	71
Figura 43. Piezas laterales de la estación de carga.....	72
Figura 44. Ensamblaje de las piezas de la estación.....	72
Figura 45. Estructura de la estación de carga.....	73
Figura 46. Instalación de los elementos de la estación de carga.....	74
Figura 47. Esquema de conexión del circuito de conmutación.....	75
Figura 48. Circuito de conmutación en placa PCB	75
Figura 49. Diagrama de secuencia de programación en el circuito de conmutación .	76
Figura 50. Diseño de la estructura para el receptor.....	77
Figura 51. Receptor con su estructura instalada en el UAV	77
Figura 52. Conexión del módulo de telemetría a la controladora de vuelo	78
Figura 53. Conexión del motor NEMA17 y el módulo A4988.....	79
Figura 54. Diagrama de secuencia del sistema automatizado.....	79
Figura 55. Sistema de carga automatizado.....	80
Figura 56. Sistema inteligente de carga inalámbrica	81
Figura 57. Señal en el módulo transmisor XKT-801	85
Figura 58. Señal de la energía captada en el módulo receptor XKT-3170	86
Figura 59. Medición en el sistema IPT con osciloscopio.....	86
Figura 60. Tabla de datos del consumo general de la estación	93

Figura 61. Tabla de datos del consumo generado por transmisor.....	93
Figura 62. Dashboard de visualización de datos con telemetría	94
Figura 63. Gráfica de corriente y potencia de consumo en Grafana.....	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Pruebas de vuelo del UAV con la carga tradicional.....	107
Anexo B. Esquema de conexiones de los sensores	108
Anexo C. Diagramas de plataformas de desarrollo embebido	110
Anexo D. Placa controladora de vuelo.....	112
Anexo E. Código de la estación de carga.....	113
Anexo F. Código de los datos del UAV.....	118
Anexo G. Código para publicación de datos en MYSQL de la estación	121
Anexo H. Código PHP para publicación de datos en MYSQL del UAV	122
Anexo I. Circuito conmutador.....	123
Anexo J. Código del circuito de conmutación	124
Anexo K. Pruebas de vuelo del UAV con la carga inalámbrica incorporada.	125
Anexo L. Construcción de las bobinas.....	127
Anexo M. Pruebas de funcionamiento de las bobinas	128
Anexo N. Toma de datos de las bobinas	130
Anexo O. IV Feria Tecnológica FISEI 2024	131
Anexo P. Colaboración con la CIDFAE	132

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de investigación se centró en la implementación de un sistema telemetrizado de carga inalámbrica con tecnología inteligente para vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la Universidad Técnica de Ambato. Se comenzó con un análisis de las deficiencias del proceso de carga tradicional por cable en los UAV's, identificando la necesidad de una solución más eficiente.

Se realizó un estudio detallado sobre tecnologías de carga inalámbrica, incluyendo la fundamentación matemática para la transferencia de energía por inducción. Además, se comparó diferentes tipos de cables para el diseño de los inductores, considerando las pérdidas generadas en la transmisión de energía.

Se implementaron módulos de telemetría y una arquitectura IoT para la adquisición de datos en tiempo real del UAV durante las misiones y de la estación de carga en sus estados activo e inactivo. La metodología incluye el diseño y la integración de estos sistemas para asegurar la eficiencia y fiabilidad del proceso de carga.

Se desarrolló un servidor para almacenar los datos obtenidos de la arquitectura IoT en la estación de carga inalámbrica como en el UAV. Utilizando el protocolo de comunicación MQTT y la base de datos en MySQL se realizó el control y la generación de reportes, visualizables en un dashboard de Grafana.

Los resultados obtenidos mostraron que el sistema de carga inalámbrica reduce significativamente el tiempo de inactividad de los UAV's y mejora la eficiencia operativa. La implementación de la arquitectura IoT permitió un monitoreo en tiempo real, facilitando la gestión y mantenimientos de los UAV's.

Palabras clave: Telemetría, carga inalámbrica, UAV, inducción

ABSTRACT

This research focused on the implementation of a telemetry-enabled wireless charging system with smart technology for unmanned aerial vehicles (UAVs) at the Technical University of Ambato. It began with an analysis of the deficiencies in the traditional wired charging process for UAVs, identifying the need for a more efficient solution.

A detailed study was conducted on wireless charging technologies, including the mathematical foundation for energy transfer by induction. Additionally, different types of cables were compared for the design of inductors, considering the losses generated during energy transmission.

Telemetry modules and an IoT architecture were implemented for real-time data acquisition from the UAV during missions and from the charging station in its active and inactive states. The methodology included the design and integration of these systems to ensure the efficiency and reliability of the charging process.

A server was developed to store the data obtained from the IoT architecture at both the wireless charging station and the UAV. Using the MQTT communication protocol and a MySQL database, control and report generation were carried out, which could be visualized on a Grafana dashboard.

The results showed that the wireless charging system significantly reduces the downtime of UAVs and improves operational efficiency. The implementation of the IoT architecture enabled real-time monitoring, facilitating the management and maintenance of the UAVs.

Keywords: Telemetry, wireless charging, UAV, induction

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA TELEMETRIZADO DE CARGA INALÁMBRICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

1.1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, los drones desempeñan un papel esencial para optimizar diversas operaciones en sectores comerciales, industriales, civiles y militares. Sin embargo, estos dispositivos están limitados por su autonomía de vuelo, esto se relaciona directamente con el sistema tradicional de carga por cable. Estos sistemas son ineficientes no solo por los procesos requeridos para la carga sino también por la carencia de telemetría en su funcionamiento. [1]

La eficacia en las misiones de vehículos aéreos no tripulados está relacionada con su tiempo de vuelo efectivo y el tiempo efectuado en el proceso de recarga. En el caso de los UAV comerciales de gama baja, media y alta de la marca DJI, la autonomía varía entre 22 y 40 minutos cuando están completamente cargados y sin peso adicional. Al emplear sistemas de carga tradicional por cable se incluye ineficiencias temporales ligadas a proceso de recarga. [1]

Además, los vehículos aéreos no tripulados desarrollan misiones en entornos remotos y en ocasiones alejados de la civilización. Los sistemas de carga tradicional por cable no están preparados para enfrentar condiciones climáticas adversas que pueden oxidar los contactos, daño de los cables y contaminación en la conexión que pueden generar chispas eléctricas y riesgo de fugas afectando al sistema de carga requiriendo de asistencia humana en el proceso y mantenimiento constante de los conectores. [2]

La Universidad Técnica de Ambato está explorando las oportunidades que ofrecen los vehículos aéreos no tripulados y las diversas aplicaciones que pueden desarrollarse con ellos. No obstante, las investigaciones se ven limitadas por la corta autonomía de vuelo

de los drones, principalmente debido al sistema de carga actual. Este sistema introduce un retraso en la ejecución de las misiones debido a procesos ineficientes y prolongados de recarga.

Los distintos fabricantes de dispositivos electrónicos de carga energética no cuentan con un sistema para el control de consumo energético de estos, esto genera la carencia de detección de anomalías en tiempo real, lo que puede llevar a interrupciones no planificadas y costosas reparaciones. La falta de control a distancia y administración de patrones de consumo energético limita la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante problemas críticos. [3]

En Ecuador, existe un índice elevado en el desperdicio de energía, donde el 64% se pierde y solo se aprovecha el 36% de la producción eléctrica. Este derroche energético es resultado de la carencia de sistemas de carga inteligentes que permitan un control efectivo del consumo de dispositivos, tanto en los hogares como en la industria. La mayoría de los fabricantes de dispositivos que requieren energía eléctrica se concentran en su rendimiento sin prestar la debida atención al uso eficiente de la energía, lo que incluye a los fabricantes de sistemas de carga para drones. [4]

El sistema de carga por cable implementado en los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) de la Universidad Técnica de Ambato carece de monitoreo del consumo energético provocando inconvenientes técnicos y económicos. El desconocimiento de la magnitud de las variables físicas involucradas en el proceso de carga conduce a inseguridad operativa y mayor consumo de energía generando un incremento en los costos de consumo y mantenimiento del sistema.

1.2 Antecedentes investigativos

Según Prithvi Krishna Chittoor, Bharatiraja Chokkalingam y Lucian Mihet-Popa en Abril de 2021 con su publicación en el IEEE “A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards” existen varios métodos para incrementar la autonomía de vuelo en drones que son el Battery Dumping, la instalación de paneles solares en las alas de los UAV, emisión láser y Wireless Power Transfer (WPT) que es utilizando tecnología electromagnética, siendo

el más efectivo este último. Como técnicas de carga resonante para sistemas WPT se tienen tres opciones: capacitiva, inductiva y magnética. Los UAV son utilizados en aplicaciones militares y necesidades civiles, así un sistema de carga inalámbrico cuenta con mayor eficiencia que uno por cable ya que puede manejar múltiples dispositivos, ahorra tiempos de conexión y reduce estrés en los operadores. [5]

En el estudio “Unmanned Aerial Vehicle Wireless Charging System With Orthogonal Magnetic Structure and Position Correction Aid Device” desarrollado por WU, Cai, Jiang, Li y Yang en 2021 se propone el diseño y la fabricación de un sistema de carga inalámbrica, que incluye una estación base de carga inalámbrica y un vehículo aéreo no tripulado (UAV) con capacidad de carga inalámbrica para ampliar el rango de trabajo del UAV. En primer lugar, se propone un acoplador magnético optimizado con una estructura magnética ortogonal con un núcleo magnético blando flexible en el receptor para garantizar una alta eficiencia y una interferencia de flujo magnético de baja fuga. En segundo lugar, se diseña y analiza en detalle una topología de circuito de carga inalámbrica y un controlador de potencia de bucle cerrado implementado en el lado primario para mantener la carga constante de corriente/voltaje constante para el UAV. Los resultados obtenidos de los experimentos indican que el sistema de carga inalámbrica desarrollado tiene la capacidad de suministrar 87,4 vatios con una eficiencia de conversión de corriente continua a batería del 87,3%. [6]

En la investigación titulada " Optimum Design of Wireless Charging System Based on Magnetic Coupling" realizada por Zhen Wei, Zhenbo Lan, Shujuan Li, Liu Bo, Bin Wu y Mingjiang Yu en 2019, se aborda la temática de la carga inalámbrica aplicada a vehículos aéreos no tripulados (UAV), específicamente en el ámbito de la inspección de líneas de transmisión eléctrica. En este contexto, la metodología empleada engloba el diseño y la optimización de un sistema, así como el análisis de la influencia entre el giro de la bobina y los parámetros de adquisición de energía en el transformador de corriente (CT). Los resultados obtenidos destacan el diseño óptimo de los parámetros de la bobina para una unidad de carga inalámbrica. Este enfoque tiene el potencial de mejorar la resistencia de los UAV utilizados en la inspección de líneas de transmisión, proporcionando un respaldo fundamental para llevar a cabo inspecciones confiables de líneas de manera segura y estable. [7]

Por su parte Campi, Cruciani, Maradei y Feliziani con la publicación “Wireless Charging System Integrated in a Small Unmanned Aerial Vehicle (UAV) with High Tolerance to Planar Coil Misalignment” en el IEEE en el año 2019, el sistema de carga inalámbrica inductiva resulta del diseño de dos bobinas, una es la bobina que se encuentra a bordo del dron, y la otra se encuentra instalada en una estación base. Este sistema requiere de una perfecta alineación lateral en busca de obtener una mayor eficiencia en la carga, ya que el campo magnético es mucho mayor cerca del cable de la bobina primaria. Los resultados demuestran una alta tolerancia de la solución propuesta a una desalineación lateral de la bobina en combinación con una alta eficiencia y un peso reducido de los componentes a bordo. [8]

Por otra parte Aqeel Mahmood Jawad, Haider Mahmood Jawad, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan, Nor Fadzilah Abdullah y Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, en el 2019 con su investigación “Wireless Power Transfer With Magnetic Resonator Coupling and Sleep/Active Strategy for a Drone Charging Station in Smart Agriculture” analizan que los drones se pueden utilizar en aplicaciones agrícolas para monitorear el rendimiento de los cultivos y las condiciones climáticas enfrentando desafíos y limitaciones, como el tiempo de vuelo de los drones, el consumo de energía y la distancia de comunicación, que se abordan en este estudio. La transferencia de energía inalámbrica (WPT) se emplea para cargar baterías de drones mediante la técnica de acoplamiento por resonancia magnética (MRC). Esta metodología, que utiliza una bobina espiral plana (FSC) en el circuito transmisor y una bobina multivuelta (MTC) en el circuito receptor del dron, demuestra una alta eficiencia y transferencia de potencia incluso en condiciones de desalineación. Con FSC y MTC, se alcanzan tasas de transferencia de potencia y eficiencia de 20,46 W y 85,25%, respectivamente, a una distancia de 0 cm bajo condiciones de alineación. Estas bobinas también mejoran la eficiencia en situaciones desalineadas, logrando una transferencia de potencia máxima de 17,1 W con una eficiencia del 71% y un espacio de aire de 1 cm entre las bobinas durante la carga de la batería del dron. Además, se implementó una estrategia de suspensión/activa que amplió la duración de la batería del dron a 851 minutos, en comparación con los 25,84 minutos de la operación tradicional, logrando así un ahorro energético del 96,9%. [9]

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Vehículos aéreos no tripulados (UAV's)

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV's, Unmanned Aerial Vehicles), son aeronaves que pueden operarse sin la presencia de un piloto a bordo. Inicialmente fueron desarrollados con propósitos militares, sin embargo, su versatilidad y ventajas técnicas han llevado a su adopción en diversos campos de la ingeniería, la Administración Federal de Aviación (FAA) autorizó su uso civil en altitudes específicas. La capacidad de ser controlados de forma remota convierte a los vehículos aéreos no tripulados en herramientas esenciales en muchas ocupaciones, ofreciendo eficiencia y reducción de costos. [10]

Con la integración de sensores, giroscopios y sistemas de posicionamiento global (GPS), estos vehículos no están limitados a la dirección por control remoto, sino que también pueden realizar misiones específicas con un grado de autonomía considerable. [10]

a. Clasificación de los UAV's

Los UAV's se clasifican en dos categorías fundamentales de acuerdo con su configuración: de ala fija y de ala giratoria. A continuación, se ofrece un análisis detallado de cada una de estas categorizaciones. [11]

- ***Configuración de ala fija***

Los UAV's que tienen configuración de ala fija se caracterizan por su diseño aerodinámico similar al de un avión convencional otorgando la capacidad de realizar despegues horizontales, estabilidad, una mayor autonomía y capacidad de carga útil. Pueden presentar una variedad de diseño de ala, que incluyen configuraciones convencionales, ala volante, canard, rectangular, joined wing, trapezoidal o delta con distintas características como la presencia de flecha, posición de alas (alta, media o baja) y geometría de la cola como un estabilizador horizontal, cola en V o de doble cara. Gracias a esta diversidad en sus diseños que proporcionan estabilidad y resistencia a condiciones climáticas adversas se pueden adaptar a distintos propósitos

o entornos operativos [11]. En la Figura 1 se muestra un UAV con su configuración de ala fija.



Figura 1. UAV de ala fija

- ***Configuración de ala giratoria***

Los UAV's de ala giratoria se destacan por la capacidad de mantenerse en vuelo con la rotación de uno o varios conjuntos de hélices montadas en brazos móviles, característica que les permite despegar y aterrizar de forma vertical. Su diseño compacto brinda versatilidad para operar en espacios reducidos o urbanos, haciéndolos ideales para aplicaciones como vigilancia, mapeo, entregas, búsqueda y rescate. Son estables en vientos y pueden permanecer estacionarios. En la Tabla 1 se detalla la clasificación de UAV's por número de rotores. [11]

Tabla 1. Clasificación de UAV's por número de rotores

Tipo de UAV	Número de rotores	Configuración de hélices	Ilustración
Mono-rotor	1	Una	
Bi-rotor	2	Coaxial, Tándem	
Tri-rotor	3	Triangular	
Quad-Rotor	4	Cuadrada	
Hexa-rotor	6	Hexagonal	

b. Autonomía de vuelo en UAV's

La autonomía de los UAV's varía significativamente en función de la calidad de la batería y las características específicas de la aeronave. En misiones que requieren seguimiento de objetivos a distancias de hasta 10 km desde el punto de despegue con velocidades que oscilan entre 10 y 20 m/s, se requieren autonomías entre 60 y 90 minutos. Sin embargo, varios factores afectan esta autonomía, como el peso de la aeronave, su fuente de energía, el techo de operación, variación de altitud, giros en un punto fijo y las condiciones meteorológicas. [12]

Los UAV's comerciales suelen estar equipados con baterías de litio que proporcionan un tiempo de vuelo que oscila entre los 20 y 40 minutos. Esta limitación en el tiempo de operación por control remoto o de forma autónoma puede resultar en fallas en diversas tareas, especialmente en misiones donde es esencial la continuidad de vuelo como en aplicaciones militares o en el monitoreo de líneas de producción. [13]

c. Sistema de alimentación de drones

Existen UAV's de tipo militar y motorizados que utilizan distintas fuentes de energía fósil, como metano, hidrógeno y gasolina. Estos combustibles tienen la capacidad de generar más energía que las baterías, sin embargo, su eficiencia en los motores de combustión interna de los UAV's es considerablemente baja, generando una estabilidad baja en UAV's comerciales de menor tamaño. [14]

Las baterías de polímero de litio (Li-Po) son mayormente utilizadas para UAV's pequeños debido a su peso ligero, proporcionan una fuente de alimentación más extendida debido a su energía media específica, alta potencia y ciclos de vida útil prolongados. Aunque existen otras alternativas como las baterías de níquel-metal (Ni-Mh), níquel-cadmio (Ni-Cd) y litio-azufre (Li-S), en la Tabla 2 se presenta una comparativa entre los distintos tipos de batería evidenciando la superioridad del tipo Li-Po. [14]

Otras fuentes de energía son los paneles solares de energía renovable, células de combustible de membrana de electrolito polimérico, supercondensadores y tecnologías

láser. Las baterías y supercondensadores almacenan energía de forma simultánea que los paneles solares las proveen. [14]

Tabla 2. Comparación de distintos tipos de batería para UAV [14]

Tipo de Batería	Energía específica (Wh/Kg)	Densidad de Energía (Wh/L)	Potencia específica (W/Kg)
Ni-Cd	40	100	300
Ni-Mh	80	300	900
Li-Po	180	300	2800
Li-S	350	350	600

1.3.2 Técnicas de carga de baterías para UAV's

a. Carga mediante baterías

Los UAV's emplean sistemas de alimentación basados en baterías, destacándose por su contribución al funcionamiento de los drones. Estas fuentes de energía proporcionan una mayor flexibilidad y simplicidad en la propulsión debido a la capacidad de carga limitada que restringe la duración operativa. Las baterías de polímero de Litio son mayormente empleadas debido a su relación óptima entre energía y peso. [15]

b. Intercambio de batería

Se identifica como una estrategia viable para la recarga de UAV's, consiste en el reemplazo de baterías descargadas por otras baterías previamente cargadas. El procedimiento consiste en el intercambio de baterías en caliente, esto posibilita la operación continua del UAV durante el proceso de sustitución, aunque puede requerir intervención manual para su ejecución. [15]

c. Planeo dinámico

Esta técnica de carga está inspirada en el formato de vuelo de los albatros, este enfoque incrementa la durabilidad de las misiones de los UAV's con la captación de energía cinética del viento y las corrientes aéreas, evitando el consumo de la energía de la batería. Esta técnica se limita a UAV's de ala fija, esta configuración es ideal para la explotación de las dinámicas del viento. [15]

d. Conectados por cable

Este sistema se destaca por generar una autonomía potencialmente ilimitada, al recibir energía de manera constante a través de un cable desde una estación de carga en tierra, esta característica elimina la necesidad de aterrizajes frecuentes para recarga. Esta técnica disminuye el rango de movimiento del UAV, tiene mayor utilidad en aplicaciones estacionarias donde el rango de movimiento se mantiene limitado. [15]

e. Carga mediante líneas de energía

Esta propuesta investiga la capacidad de los UAV's para recargar sus baterías directamente desde líneas eléctricas existentes, mediante el acoplamiento en conductores energizados. Este método representa riesgos en términos de seguridad y el requerimiento de sistemas especializados para la conversión de alta tensión a un nivel seguro para los UAV's. [15]

f. Celdas de combustible

Es una alternativa para incrementar la autonomía en misiones con larga duración, generando una densidad energética superior en comparación con los sistemas de baterías convencionales. La problemática de esta técnica incluye el manejo del combustible, el peso de las celdas y la integración con la arquitectura eléctrica del UAV. [15]

g. Supercondensadores

Proporcionan una solución eficaz para el almacenamiento de energía rápido, debido a su elevada densidad de potencia y capacidad de respuesta inmediata, resulta útil para la estabilización de la carga y suministro de picos de energía. Aunque pueden mejorar la respuesta y eficiencia del sistema de potencia, no son adecuados como única fuente de energía en vuelos prologados comparada con las baterías debido a su baja densidad energética. [15]

h. Carga mediante células fotovoltaicas

Emplea tecnología basada en células solares para extender la operatividad de los UAV's, aprovechando la energía solar para la recarga de baterías. Existe afectación

por la eficiencia de las células solares bajo diversas condiciones de iluminación, el peso adicional y la necesidad de maximizar la exposición a la luz solar sin comprometer el rendimiento aerodinámico. [15]

i. Transferencia de energía inalámbrica (Wireless Power Transfer)

La transferencia de energía inalámbrica es un conjunto de técnicas que permiten la transferencia de energía eléctrica desde una fuente de energía a un consumidor sin la necesidad de conexiones físicas, como cables o contactos directos. [15]

1.3.3 Wireless Power Transfer (WPT)

La transferencia inalámbrica de energía ha experimentado una evolución considerable desde sus fases iniciales, presentándose como una alternativa práctica para suministrar energía y cargar dispositivos sin necesidad de conexiones físicas directas. Esta tecnología aprovecha los campos electromagnéticos para la transmisión de energía de una fuente de alimentación a un receptor utilizando como medio el aire, suprimiendo el uso de conectores y cables. En la Figura 2 se presenta la clasificación general de la WPT según su mecanismo de transmisión. [16]

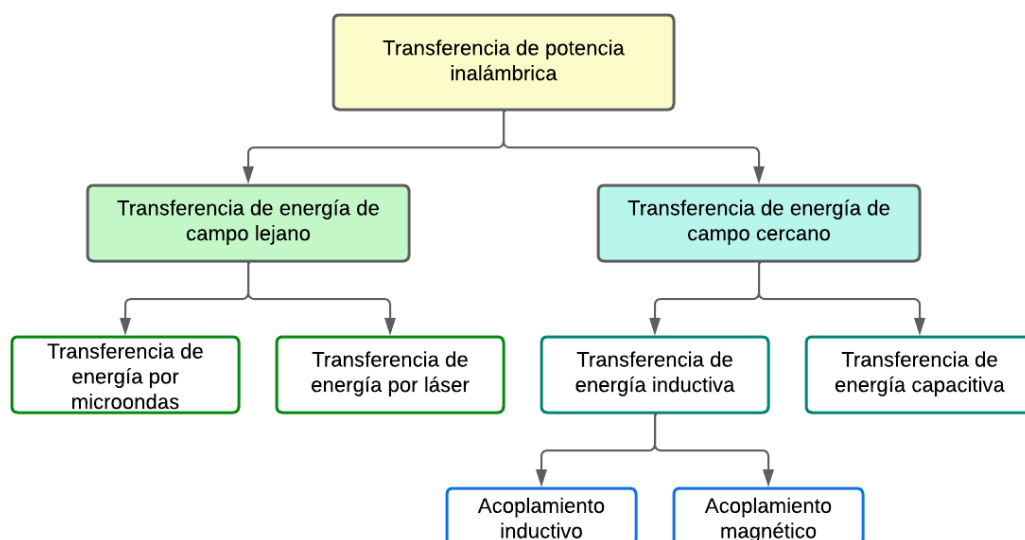


Figura 2. Clasificación general de la WPT

j. Ventajas y desventajas de los sistemas inalámbricos de transferencia de energía

Los sistemas inalámbricos de transferencia de energía cuentan con diversas ventajas y desventajas que se deben considerar para su aplicación. Algunas de las ventajas y desventajas se muestran en la Tabla 3. [17]

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la WPT [17]

Ventajas	Desventajas
Comodidad: elimina la necesidad de conexiones físicas	Costo: los sistemas de carga inalámbrica tienen costos iniciales más elevados comparados con cargadores cableados tradicionales
Eficiencia económica: reduce la dependencia de componentes físicos y el mantenimiento	Posicionamiento preciso: requiere una colocación exacta del dispositivo sobre el cargador para una transferencia eficiente de energía
Capacidad multi – dispositivos: permite la carga simultánea de múltiples dispositivos	Interferencias: posibles interferencias con otros sistemas de comunicación debido al uso del espectro electromagnético
Resistencia a entornos adversos: ofrece robustez en condiciones extremas (humedad, suciedad, movimiento)	Sensibilidad al clima: la niebla y lluvia afectan las aplicaciones prácticas del WPT basado en microondas y láseres
Diseño simplificado: facilita la creación de dispositivos herméticamente sellados	Rango limitado: técnicas como el WPT capacitivo tiene un alcance limitado que afecta su viabilidad
Eficiencia alta a corta distancia: en configuraciones óptimas, la eficiencia puede ser alta	Pérdida de eficiencia con la distancia: la eficiencia disminuye a medida que aumenta la distancia entre los dispositivos

a. Transferencia de energía en campo lejano

La transmisión de energía inalámbrica de campo lejano usa las ondas electromagnéticas en forme de señal de radiofrecuencia para la transferencia de energía. En general la transferencia de energía en campo lejano se realiza por medio de microondas (MPT) y transferencia de energía por láser (LPT). [16]

• Transmisión de potencia por microondas (TPM)

Esta técnica constituye un mecanismo de transferencia de energía inalámbrica, empleando radiación electromagnética en el espectro de los microondas, tiene aplicaciones significativas dentro del sector aeronáutico, particularmente en el suministro energético de UAV. Las ondas de radio son emitidas por antenas especializadas conectadas a dispositivos microondas desde el transmisor al receptor donde se convierte la energía del campo eléctrico de la onda en energía utilizable para la carga. [16]

La TPM incluye una elevada capacidad de potencia transmitida, elevada capacidad de potencia transmitida y versatilidad superior para la transmisión y recepción de señales. No obstante, la tecnología presenta una eficiencia de transmisión limitada que no excede el 10%, y la necesidad de usar transmisores de gran envergadura que incrementan los costos asociados a su aplicación. [16]

- ***Transferencia de energía laser***

La transmisión de energía a través de haz láser está ganando atención frente a los métodos tradicionales que usan antenas de gran tamaño, debido a su capacidad para transmitir energía de manera eficiente a largas distancias. Esta técnica convierte la energía eléctrica en luz láser concentrada, la cual se dirige hacia un receptor generalmente compuesto por paneles fotovoltaicos en satélites. [16]

La energía láser se convierte de nuevo en eléctrica en el receptor para cargar baterías o alimentar motores, utilizando módulos rectificadores de alta eficiencia para minimizar las pérdidas de energía, aunque enfrentan el desafío de requerir sistemas complejos de seguimiento debido al peligro potencial de la radiación láser para seres vivos y medio ambiente. [16]

- b. Transferencia de energía en campo cercano***

Un modelo convencional de transmisión inalámbrica de energía está compuesto por un elemento transmisor y uno receptor. Esta energía puede ser transferida por campos magnéticos o eléctricos. En función de cada caso, se emplea una de dos estrategias para la transmisión eléctrica: mediante inducción (IPT) o por capacitancia (CPT). [16]

- ***Transferencia de potencia inductiva (IPT)***

La tecnología de transferencia de potencia inductiva (IPT), en el transmisor un rectificador convierte el voltaje AC a DC y un inversor lo devuelve a AC para ser transmitido con un campo magnético generado por una bobina. En el receptor la energía captada por la bobina receptora se rectifica a corriente continua y luego se regula para su conexión a la carga. La eficiencia disminuye entre más distancia exista entre el transmisor y receptor en función del acoplamiento (inductivo/magnético) [16].

En la Figura 3 se presenta la configuración básica de un sistema de transferencia de energía por inducción.

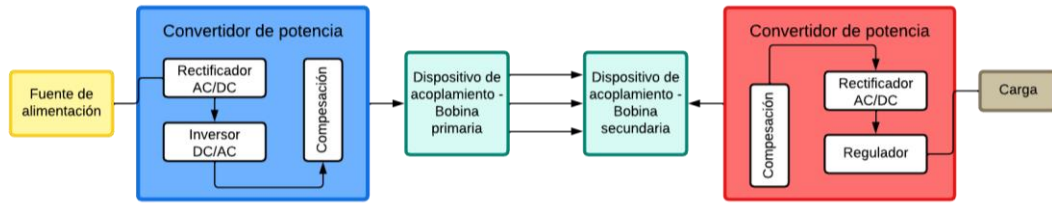


Figura 3. Wireless Power Transfer (IPT)

- ***Transferencia de potencia capacitiva***

Esta técnica se basa en el acoplamiento capacitivo entre transmisor y receptor que actúan como los electrodos de un condensador en forma de cubiertas metálicas. Aunque la tecnología CPT es más económica que la IPT, su principal desventaja es la necesidad de mantener una distancia muy corta entre el transmisor y receptor [16]. En la Figura 4 se muestra un sistema de transferencia de energía capacitiva.

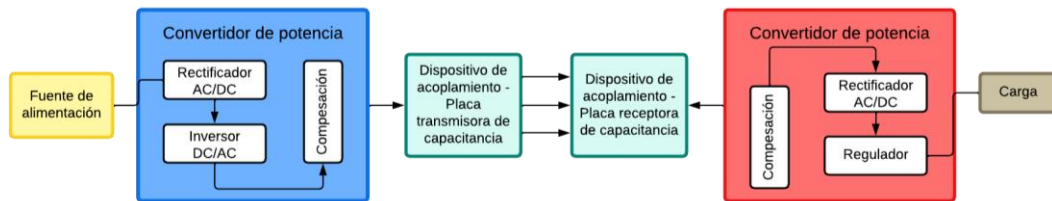


Figura 4. Wireless Power Transfer (CPT)

c. Ventajas y desventajas de los métodos de campo lejano y cercano

La tecnología de transferencia de energía inalámbrica (WPT) se ha desarrollado considerablemente para ofrecer soluciones que van desde la carga de dispositivos electrónicos hasta aplicaciones industriales y vehículos eléctricos. La Tabla 4 ofrece una comparación detallada entre los tipos de tecnologías WPT clasificadas en campo cercano y campo lejano. [18]

Cada tecnología tiene sus propias ventajas y desventajas específicas, desde la eficiencia en distancias cortas hasta la capacidad de transferir energía a largas distancias, así como diferentes niveles de complejidad y requisitos de implementación. Este análisis es fundamental para comprender cuál tecnología es la más adecuada para

aplicaciones particulares, destacando la importancia de factores como la eficiencia, seguridad y la compatibilidad con el entorno. [18]

Tabla 4. Comparativa de los métodos de campo lejano y cercano [18]

Tipo de campo	Tecnología WPT	Ventajas	Desventajas
Campo cercano	Capacitivo	• Permite una transferencia de energía de nivel medio. • Puede transferir energía a través de objetos metálicos. • Económico debido al uso de placas de aluminio. • Funciona para distancias de hasta 10 cm.	• La transferencia de energía depende de la distancia entre los componentes. • Hay problemas de capacitancia parasita. • La eficiencia ronda el 70-80%.
	Inductivo	• Alta eficiencia con una pequeña distancia entre Tx y Rx. • Es más seguro en comparación con otros modos. • Permite una transferencia de energía bidireccional. • De simple implementación. • Ofrece aislamiento galvánico.	• Distancia corta de unos mm a cm. • Requiere de blindaje EMI. • Baja eficiencia en distancias grandes. • Puede haber calentamiento si hay objetos metálicos cerca. • Alineación estricta entre transmisor y receptor.
	Resonante	• Más potencia comparada a otros métodos. • Mayormente usado en carga de vehículos eléctricos. • Ofrece aislamiento galvánico. • Permite transferencia bidireccional.	• El costo del sistema incrementa con la potencia. • Sensible a obstáculos entre las bobinas de acoplamiento, especialmente los metálicos. • Necesita blindaje para EMI.
Campo lejano	Microondas	• Puede transferir energía a largas distancias incluso varios kilómetros. • Permite la transferencia dinámica a cargas en movimiento. • Maneja varios kW. • Compatible con sistemas de comunicación.	• Menos eficiencia que otros métodos. • Difícil implementación. • Solo permite transferencia de energía en una dirección. • Las antenas deben ser grandes para manejar una mayor potencia.
	Láser	• Transfiere energía a través de kilómetros. • Permite transferir energía a cargas móviles. • Puede manejar varios kW. • El transmisor es pequeño en comparación con otros métodos.	• Eficiencia baja, alrededor del 20% y depende de la distancia. • Solo permite transferencia unidireccional. • Difícil de operar. • No se permiten obstáculos en el camino del haz • Peligroso para los seres vivos si están expuestos a radiación.

1.3.4 Inductive Power Transfer

La transferencia de energía por inducción (IPT) ha pasado de ser una novedad ingenieril a una tecnología clave en diversas aplicaciones en menos de treinta años. Desde su creación inicial en 1995, la IPT ha crecido hasta convertirse en una industria que genera millones de dólares globalmente. Esta tecnología permite la transferencia de energía eléctrica a través de un espacio de aire, sin conexión física directa, mediante el uso de campos magnéticos generados por bobinas de acoplamiento sintonizadas a una frecuencia específica para optimizar la eficiencia energética. [19]

Las aplicaciones de la IPT son variadas y abarcan desde la automatización de procesos industriales hasta la carga de dispositivos biomédicos y vehículos eléctricos, estos últimos tanto en modo estáticos como dinámicos implementados en carreteras. Este avance tecnológico está basado en los principios de electromagnetismo descubiertos por figuras históricas como Ampere y Faraday, mejorados significativamente con el desarrollo en técnicas de diseño magnético y control electrónico. [19]

A medida que la tecnología de IPT avanza, se exploran aplicaciones cada vez más desafiantes que prometen revolucionar no solo la infraestructura de transporte sino también la manera en que gestionamos y utilizamos la energía eléctrica. A pesar de los retos técnicos que aún quedan por resolver, la IPT se perfila como una solución energética futurista que ofrece mayores niveles de seguridad, eficiencia y automatización para una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales. [19]

a. Principios y configuraciones

Un sistema IPT estándar, que incluye dos bobinas que se acoplan magnéticamente, se puede representar utilizando del denominado modelo T de un transformador, tal como se ilustra en la Figura 5. En este modelo, R_p representa la resistencia de la bobina primaria o transmisora y L_p su autoinductancia. M denota la inductancia mutua entre la bobina primaria y la bobina secundaria. Por otro lado, R_s y L_s corresponden a la resistencia y autoinductancia de la bobina secundaria, respectivamente. Es importante señalar que las diferencia $L_p - M$ y $L_s - M$ reflejan la inductancia de fuga de las bobinas primaria y secundaria, respectivamente. [20]

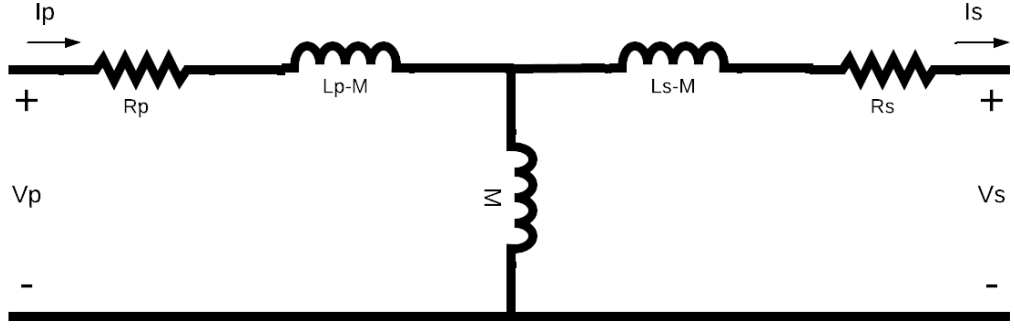


Figura 5. Circuito equivalente de dos inductores acoplados basado en el modelo T de un transformador [20]

En sistemas con acoplamiento débil, como suele ser el caso en muchas aplicaciones de IPT, estas inductancias de fuga son significativamente mayores que la inductancia mutua, se puede calcular usando la siguiente fórmula: [20]

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

Las ecuaciones en el dominio del tiempo referente al voltaje de entrada y salida que interviene en el modelo T de un transformador se definen de la siguiente forma: [20]

$$v_p(t) = R_p i_p(t) + L_p \frac{di_p(t)}{dt} - M \frac{di_s(t)}{dt} \quad (2)$$

$$v_s(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} - M \frac{di_p(t)}{dt} \quad (3)$$

En condiciones de estado estacionario, se puede reescribir las Ecuaciones 2 y 3, en forma de fasores que giran a una frecuencia específica ω . [20]

$$v_p = R_p i_p + j\omega L_p i_p - j\omega M i_s \quad (4)$$

$$v_s = R_s i_s + j\omega L_s i_s - j\omega M i_p \quad (5)$$

Cuando se conecta una carga resistiva en el secundario como puede ser una batería LiPo, las Ecuaciones 4 y 5 se pueden reformular así: [20]

$$v_p = R_p i_p + j\omega L_p i_p - j\omega M i_s = Z_p i_p - j\omega M i_s \quad (6)$$

$$0 = R_L i_s + R_s i_s + j\omega L_s i_s - j\omega M i_p = Z_s i_s - j\omega M i_p \quad (7)$$

En donde Z_s que es la impedancia secundaria, se compone de la sumatoria de R_L , R_s , y $j\omega L_s$, incluyendo así la resistencia que aporta la carga. La corriente que circula por el circuito secundario se puede determinar utilizando la Ecuación (8), basada en la corriente del circuito primario. [20]

$$i_s = \frac{j\omega M}{Z_s} i_p \quad (8)$$

Luego, reemplazando la Ecuación (8) en la (6), se obtiene una expresión que relaciona el voltaje y la corriente obtenidas en el circuito primario.

$$v_p = Z_p i_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} i_p = \left(Z_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \right) i_p \quad (9)$$

La Ecuación (9) indica la impedancia total del circuito tal como se percibe desde el lado del primario. El componente de esta impedancia que se refiere a la del secundario, visto desde el primario y conocido como la impedancia reflejada, se puede describir de la siguiente forma. [20]

$$Z_s^p = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} = \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_s)}{(R_L + R_s)^2 + \omega^2 L_s^2} - j \frac{\omega^3 M^2 L_s}{(R_L + R_s)^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (10)$$

Con esto la potencia activa resultante se transfiere al secundario bajo el principio establecido en la siguiente Ecuación. [20]

$$P_s = \Re(Z_s^p) I_{p_{rms}}^2 = \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_s)}{(R_L + R_s)^2 + \omega^2 L_s^2} I_{p_{rms}}^2 \quad (11)$$

En la ecuación $I_{p_{rms}}$ representa el valor eficaz (RMS) de i_p . Según se desprende de la Ecuación (11), es posible maximizar la capacidad de transferencia del sistema IPT si se compensa el término $\omega^2 M^2$ mediante la adición de un capacitor en el circuito secundario para formar un circuito resonante, operando así en la frecuencia de resonancia obtenida.

Por otro lado, conforme a la Ecuación (9), se puede reducir la calificación de voltios-amperios (VA) del sistema de alimentación minimizando Z_p con la adición de un capacitor que compense la autoinductancia de la bobina primaria. Estos capacitores pueden conectarse tanto en serie como en paralelo con las bobinas primara y secundaria. [20]

b. Redes de compensación

Las redes de compensación son esenciales en los sistemas de carga inductiva, ofreciendo múltiples beneficios. Estas redes compensan la inductancia de fuga considerable resultante de una distancia de aire significativa, mejorando así la potencia y eficiencia del sistema. [21]

Además, reducen los requerimientos de potencia aparente suministrando potencia reactiva, logran una operación con un factor de potencia unitario sin desfase para evitar análisis de bifurcación y permiten la conmutación suave para dispositivos electrónicos. La integración de elementos de compensación en el circuito de carga fue motivada por un estudio del MIT en 2007, que demostró una mejora sustancial en la eficiencia de transmisión tras la incorporación de estos elementos. [21]

Las técnicas de compensación se clasifican en dos categorías: técnicas básicas y técnicas mixtas. Las técnicas básicas conectan capacitores resonantes en serie o paralelo tanto al transmisor como al receptor, incluyendo compensación serie-serie, serie-paralelo, paralelo-serie y paralelo-paralelo. Las técnicas híbridas, que combinan capacitores e inductores [21].

En la Figura 6 se presentan varias configuraciones de redes de compensación: (a)serie-serie, (b)serie-paralelo, (c)paralelo-serie, (d)paralelo-paralelo, (e)LCL-LCL, (f)LCC-S, (g)LCC-LCC, (h)CCL-LC, (i)LC-LC, (j) S-LCL, (k)CCL-S y (l)S-CL.

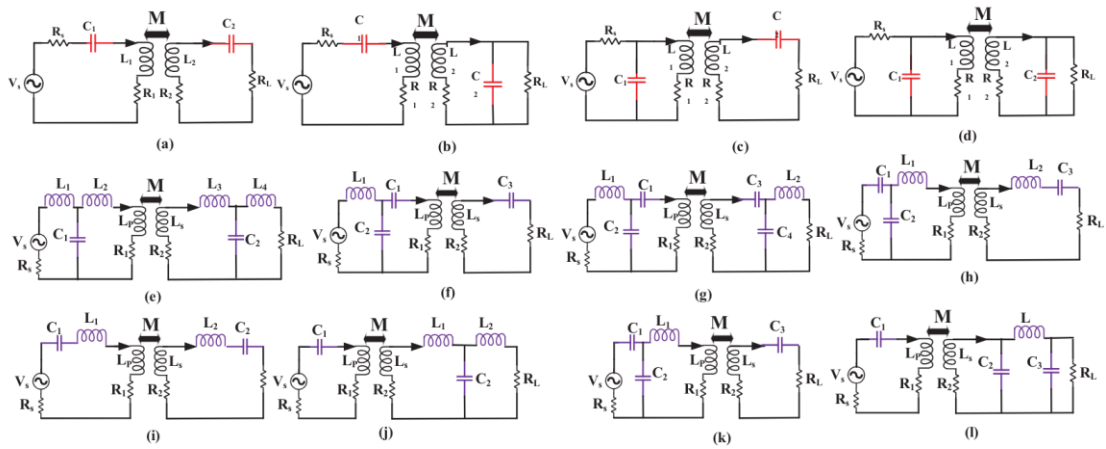


Figura 6. Varias configuraciones redes de compensación [21]

Las técnicas básicas son las más estudiadas y mayormente desarrolladas. En la Tabla 5 se presenta una comparación de las cuatro topologías básicas. [22]

Tabla 5. Comparación de las cuatro topologías básicas [22]

Parámetro		Topologías			
		SS	SP	PS	PP
Impedancia Total		Se reduce con desalineación	Se reduce con desalineación	Incrementa con desalineación	Incrementa con desalineación
Sensibilidad de desalineación		Baja	Ligeramente superior a SS	Alta	Alta
Impedancia del factor de acoplamiento y la impedancia de carga	Transmisor	Si	Si	No	No
	Receptor	Si	No	Si	No
Margen de acoplamiento cero		No permitido	Permitido	Permitido	Permitido
Eficiencia		Muy alta	Baja	Baja	Alta
Potencia de salida		Alta	Alta	Baja	Baja
Carga de salida independiente		Voltaje y corriente	Voltaje y corriente	Solo Voltaje	Solo Corriente
Nivel de potencia propuesto		Preferido para alto nivel de potencia	Bajo o medio nivel de potencia	Alto nivel de potencia	Alto nivel de potencia
Aplicaciones propuestas		Sistemas WPT (carga estática y dinámica) para vehículos eléctricos	Aplicaciones biomédica y aplicaciones de baja potencia	Aplicaciones de alta potencia, vehículos eléctricos y buses.	Aplicaciones de alta potencia, vehículos eléctricos y buses.

Las técnicas mixtas aumentan la eficiencia de los sistemas IPT a través de todo el rango de acoplamiento y carga, aunque con una resistencia de fuga adicional en capacitores e inductores que conduce a mayores pérdidas de cobre en comparación con las técnicas de compensación básicas. [21]

c. Estándares

Con el desarrollo de la tecnología de transferencia de potencia con inducción (IPT) se han establecido distintas normas y especificaciones para distintas aplicaciones de sistemas IPT. La Tabla 6 muestra los estándares más importantes y mayormente

desarrollados en materia de transferencia de potencia por inducción mostrando parámetros importantes como nivel de potencia y frecuencia de operación. [23]

Tabla 6. Diferentes estándares para aplicaciones IPT [23]

Estándares	Aplicaciones específicas	Nivel de Potencia	Frecuencia
SAEJ2954	Vehículos eléctricos	1.2 kW, 3.3 kW, 7.7 kW	79 KHz a 90 KHz
Qi	Teléfonos móviles y dispositivos portátiles	5 W a 120 W	80 KHz a 300 KHz
A4WP	Para campos electromagnéticos más grandes.	50 W	6.78 MHz

d. Geometría de las bobinas

- **Bobina circular en espiral (CSC)**

La bobina circular en espiral (CSC) es uno de los tipos más comunes de bobinas en los sistemas de transferencia de inductiva de energía, apreciada por su capacidad para manejar desajustes debido a sus estructura simétrica y concéntrica. El diseño en forma de espiral de la CSC crea un campo magnético cilíndricamente simétrico, facilitando una transferencia de energía efectiva aun con desplazamientos o desalineaciones entre la bobina transmisora y receptora. Esta disposición garantiza una distribución equitativa del campo magnético, esencial para maximizar la eficiencia en la transferencia de energía en aplicaciones tales como la carga de vehículos eléctricos [24]. La fórmula para el cálculo de la inductancia en una bobina circular plana es:

$$L = 31.33\mu_0 N^2 \frac{a^2}{8a + 11c} \quad (12)$$

Describiendo la Ecuación (12) L es la inductancia generada por la bobina, este valor depende de a que es el radio promedio en metros, c es la anchura de la bobina con su unidad de medida en metros, μ_0 es la permeabilidad del vacío cuyo valor es $4\pi \times 10^{-7}$ con su unidad de media (H/m) y N es el número de vueltas o espiras por las cuales está conformada la bobina [25]. En la Figura 7 se puede visualizar una bobina circular plana.

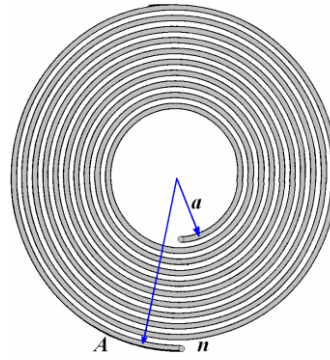


Figura 7. Bobina circular plana

- **Bobinas rectangulares y cuadradas**

Las bobinas de forma cuadrada y rectangular son claves en los sistemas de transferencia de energía por inducción, cada una con beneficios específicos derivados de su configuración. La bobina cuadrada simple en su concepción es menos preferida por su alta sensibilidad al alineamiento y la complejidad en los cálculos de su campo magnético. En cambio, la bobina rectangular es más adecuada para sistemas de carga dinámica debido a su amplia superficie que permite cubrir una región de carga mayor y así potenciar la eficiencia en la transferencia de energía. Este modelo puede ser optimizado con la inclusión de barras de ferrita para fortalecer la intensidad y uniformidad del campo magnético, mejorando su rendimiento y su capacidad para manejar desalineaciones [24]. En la Figura 8 se puede visualizar una bobina cuadrada.

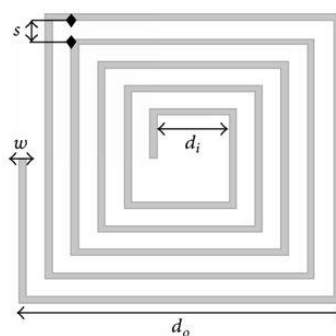


Figura 8. Bobina cuadrada

- **Bobina doble D (DDC)**

El diseño de la bobina doble D (DDC) es particularmente efectivo para sistemas de carga inalámbrica dinámica, destacando por su alta capacidad para adaptarse a desalineamientos. Esta bobina se caracteriza por tener dos segmentos en forma de “D” conectados magnéticamente en serie, con corrientes en direcciones opuestas. Esta

estructura permite que el coeficiente de acoplamiento disminuya progresivamente con el desplazamiento, manteniendo una transferencia de energía eficiente y constante a pesar de los cambios en la posición relativa entre las bobinas transmisora y receptora. El uso de núcleos de ferrita mejora la focalización del flujo magnético y reduce las pérdidas, lo que la convierte en una opción robusta para aplicaciones en vehículos eléctrico y sistemas de rieles segmentados donde los desalineamientos son frecuentes [24]. En la Figura 9 se puede visualizar una bobina de doble D.

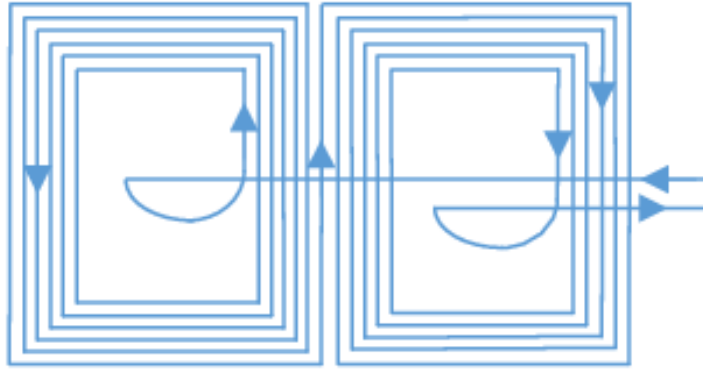


Figura 9. Bobina de doble D

e. Pérdidas en sistemas IPT

En los componentes inductivos, existen dos fuentes principales donde se originan pérdidas: el núcleo magnético y en las bobinas. Las pérdidas en el bobinado se incrementan por los efectos que genera la frecuencia. La corriente que circula a través de un conductor genera un campo magnético que, a su vez, induce corriente dentro del mismo conductor, conocido como efecto skin o efecto piel, y en los conductores cercanos, conocido como efecto de proximidad.

• Efecto Skin

El efecto Skin se produce cuando una corriente alterna (J_z en la Figura 10 a) que circula a través de un conductor induce un campo magnético en el interior (H_ϕ en la Figura 10 a), el campo magnético inducido genera que se induzca una corriente alterna (J_{eddy} en la Figura 10 b). Este efecto se explica con la ley de Faraday: [26]

$$\oint \vec{E} \, dl = - \iint \frac{d\vec{B}}{dt} \, dA \quad (13)$$

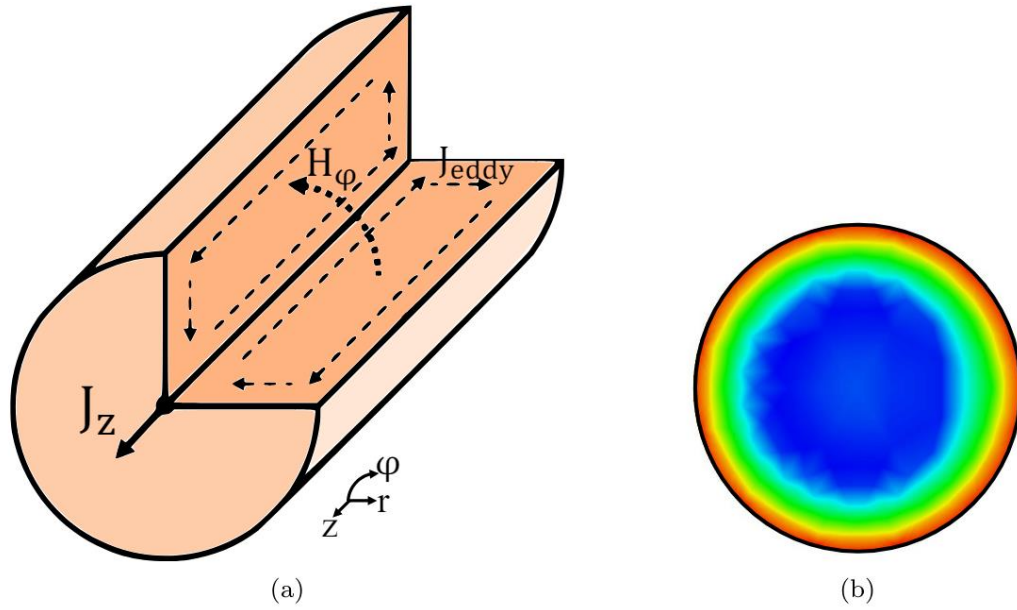


Figura 10. a) Corriente parásita inducida por la auto - corriente b) Distribución de la corriente en el conductor [26]

Este efecto se manifiesta cuando las corrientes eléctricas se tienden a distribuirse de manera desigual en un conductor, concentrándose en su superficie externa en lugar de distribuirse de manera uniforme a lo largo de su sección transversal, debido a esto la resistencia óhmica equivalente del conductor aumenta debido a la reducción del área de conducción. Este efecto se describe de acuerdo con la ecuación normalizada: [26]

$$P_{se} = F_s R_{DC} I^2 \quad (14)$$

F_s es el factor del incremento de la resistencia de corriente continua generado por el efecto skin, esto cambia con la geometría del conductor y la frecuencia, R_{DC} es la resistencia de corriente continua por unidad de longitud e I es la corriente pico que circula en el conductor. [26]

- **Efecto de proximidad**

El efecto de proximidad es un fenómeno electromagnético que se produce en conductores por los que fluye una corriente alterna, especialmente cuando están cercanos entre sí. Este fenómeno ocurre cuando el campo magnético generado por la corriente en un conductor afecta la distribución de la corriente en el mismo o en otros conductores próximos, provocando que la corriente se desplace a regiones más

alejadas de otros conductores adyacentes. Estas pérdidas inducidas se pueden normalizar y expresar con un factor sin unidades con la siguiente ecuación: [26]

$$P_{pe} = \frac{G_p}{\sigma} H^2 \quad (15)$$

Donde G_p es el factor que describe las pérdidas por el efecto de proximidad, σ es el valor de conductividad del cobre y H es el pico del campo magnético externo que afecta al conductor. [26]

Las principales consecuencias del efecto de proximidad incluyen el aumento de la resistencia efectiva del conductor, esto genera pérdidas por calentamiento y en las pérdidas de energía en forma de calor, afectando la eficiencia del sistema en aplicaciones como la transmisión de energía eléctrica o en bobinas en sistemas de inducción. [26]

1.3.5 Telemetría

Es una tecnología que facilita la medición de diversas características de un objeto y la transmisión de resultados hacia una estación remota para su visualización, almacenamiento y análisis. Para la transmisión de información típicamente es a través de señales de radio también puede ser por aire dependiendo de las necesidades. Un sistema de telemetría básico consta de sensores, acondicionamiento de señal, transmisor, receptor y una unidad de almacenamiento. [27]

Tal como se muestra en la Figura 11 la telemetría en vehículos no tripulados (UAV's) es fundamental para la captura de datos en tiempo real, facilitando un control remoto preciso y la supervisión de diferentes parámetros de vuelo, tales como la posición, velocidad y el estado general del sistema. [28]

Es importante que los distintos sistemas de telemetría en los UAV's estén diseñados para transmitir de manera segura y eficaz grandes cantidades de datos de larga distancias, especialmente durante misiones que se realizan más allá del alcance visual del piloto. [28]



Figura 11. Telemetría en UAV

En el ámbito de la aviación no tripulada, la telemetría desempeña un papel crucial al proporcionar una comunicación esencial entre el UAV y la estación de control en tierra. Este intercambio de información en tiempo real no solo facilita el control preciso, sino que también asegura la ejecución segura y eficaz de sus misiones. La telemetría en los UAV's recoge datos críticos como la posición, altitud, velocidad y orientación, permitiendo de esta manera que los operadores tomen decisiones informadas y respondan de manera adecuada a cualquier situación dinámica o emergencia que pueda surgir durante la misión del UAV.

Para entender cómo se adquiere y se emplea la telemetría, es esencial examinar los componentes tecnológicos involucrados, que van desde los sensores incorporados en el UAV hasta los sistemas avanzados de transmisión y recepción de datos. Este proceso proporciona una recopilación de datos que apoya a futuras operaciones y diseño del vehículo aéreo no tripulado.

a. Sensores integrados

Los UAV's incorporan una amplia gama de sensores diseñados para capturar datos en tiempo real. Entre ellos se encuentran sensores de posición GPS, altímetros, giroscopios, acelerómetros, entre otros. La función principal de estos dispositivos es

recolectar información precisa sobre: posición, velocidad, altitud y orientación del UAV, lo que es primordial para su operación y navegación efectiva. En la Figura 12 se muestra los distintos sensores instalados en el UAV.



Figura 12. Sensores en UAV [29]

b. Transmisión de datos

Los datos capturados por los sensores son enviados en tiempo real a una estación de control terrestre mediante radiofrecuencia, redes LTE o enlaces satelitales. Esta transmisión puede ser efectuada directamente o mediante sistemas de retransmisión, especialmente cuando el UAV opera a grandes distancias. Estos métodos de transmisión aseguran que la información vital se transmita de manera eficiente y confiable permitiendo una gestión óptima en el vuelo del UAV. En la Figura 13 se ilustra el proceso de transmisión de datos del UAV, destacando los componentes clave y la ruta que sigue la información desde su origen hasta su destino final.

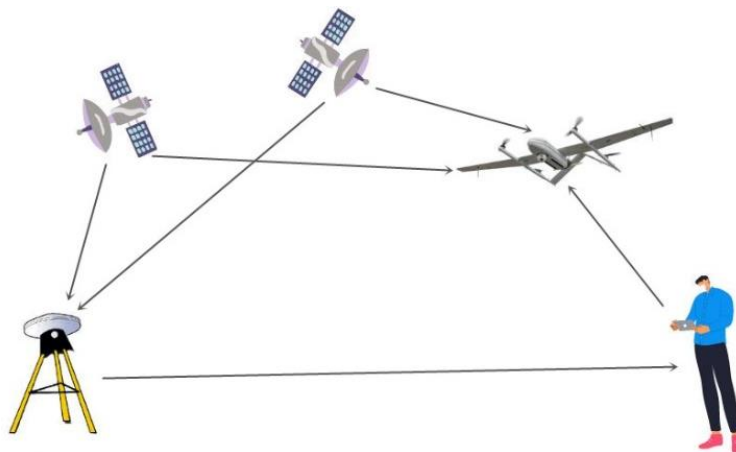


Figura 13. Transmisión de datos del UAV

c. Estación de control en tierra

En la Figura 14 se muestra la interfaz de la estación de control en tierra, a través de la cual se reciben los datos de telemetría transmitidos por el UAV, proporcionando al operador la capacidad de supervisar de manera continua el estado y rendimiento del vehículo aéreo no tripulado. Además, el análisis de estos datos ayuda en la optimización de futuras misiones, en la seguridad y mantenimiento preventivo del UAV.



Figura 14. Estación de control en tierra

d. Software especializado

La Figura 15 muestra el software de Grafana en acción, una plataforma avanzada de análisis y visualización utilizada ampliamente para el manejo de los datos de telemetría de UAV's. En esta interfaz, Grafana se destaca por su capacidad de representar gráficamente información compleja de manera clara y accesible. Los operadores pueden observar en tiempo real una variedad de métricas críticas, tales como rutas de vuelo, altitudes y estados de batería, presentadas a través de dashboards intuitivos y mapas detallados. Estas herramientas son esenciales no solo para la monitorización inmediata, sino también para interpretación profunda de los datos de vuelo, facilitando así la toma de decisiones estratégicas y la planificación de operaciones futuras. [30]

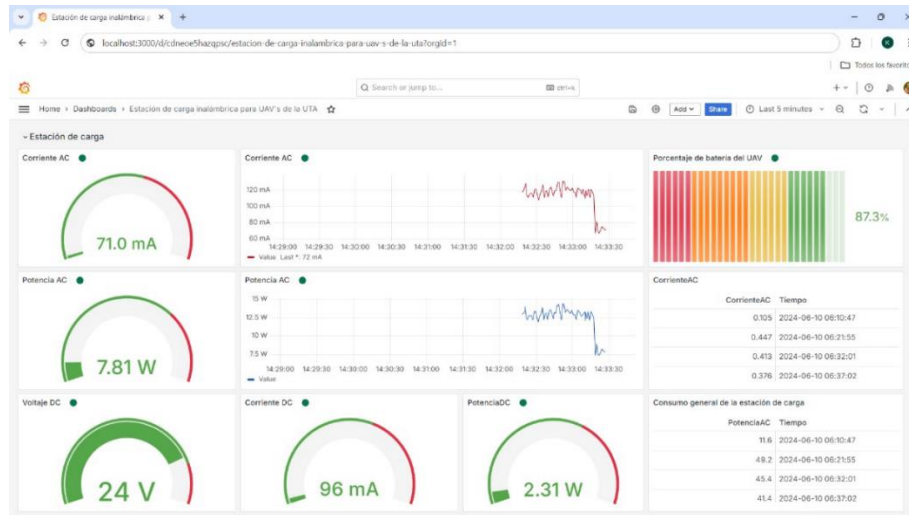


Figura 15. Software especializado (Grafana) [31]

1.3.6 Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas y normas que dictan como se transmite la información entre varios dispositivos dentro de una red. Estos protocolos son fundamentales para garantizar que los datos enviados sean comprendidos y procesados correctamente por el dispositivo receptor, independientemente de las diferencias en hardware o software. Estos protocolos definen aspectos como el formato de los datos, el método de envío, la sincronización y la corrección de errores, lo cual permite una interacción eficaz y segura entre dispositivos.

a. *Protocolo MQTT*

Es un protocolo de la capa de aplicación especialmente diseñado para el Internet de las Cosas, que se distingue por su comunicación eficaz incluso en entornos con limitados recursos computacionales y energéticos. Utiliza un sistema de publicación-suscripción que opera mediante un bróker central, el cual maneja el envío de mensajes entre dispositivos. MQTT puede funcionar con diferentes niveles de calidad de servicio, permitiendo personalizar como se garantiza la entrega de mensajes de acuerdo con las necesidades del usuario. Por otra parte, se identifican retos significativos en cuanto a la seguridad y la gestión de la conectividad entre un número creciente de dispositivos

IoT, lo que demanda avances constantes con el incremento de dispositivos interconectados. [32]

En la Figura 16 se muestra un diagrama de un broker MQTT donde tres publicadores envían datos a dos tópicos distintos, los suscriptores están conectados a estos tópicos para recibir datos específicos. El esquema destaca como se distribuyen los datos dentro de un sistema MQTT, utilizando líneas continuas para mostrar la conexión de los publicadores al bróker y líneas discontinuas para indicar la suscripción a los tópicos.

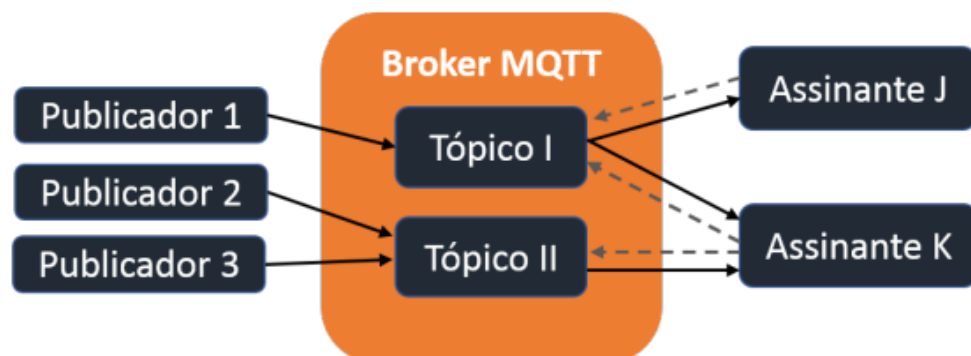


Figura 16. Comunicación editor-suscriptor adoptado por el protocolo MQTT [32]

b. Protocolo CoAP

Es un protocolo ligero que opera sobre la capa de transporte de Internet, utilizando generalmente UDP. Este protocolo es fundamental en la comunicación entre dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) y servicios web, adoptado en modelo cliente/servidor. Los dispositivos actúan como clientes que envían solicitudes a servidores que procesan estas solicitudes y devuelven las respuestas necesarias. CoAP está diseñado para manejar tanto transferencias confiables mediante confirmaciones como transferencias no confiables para reducir el consumo de recursos. [33]

Las ventajas de CoAP incluyen su eficiencia en el consumo de recursos, crucial para dispositivos IoT con limitaciones de capacidad. Además, su escalabilidad y flexibilidad lo hacen ideal para manejar numerosos dispositivos en entornos IoT, mientras que su compatibilidad con los principios web facilita la integración con infraestructuras y servicios web existentes [33]. En la Figura 17 se muestra un diagrama del uso del protocolo CoAP en entornos restringidos, contrastándolo con el protocolo HTTP en la Internet tradicional bajo el modelo REST.

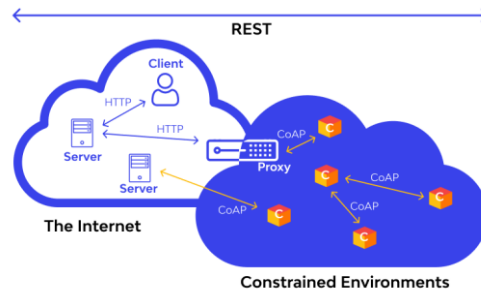


Figura 17. Protocolo CoAP [33]

c. Protocolo HTTP

HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto), es un protocolo de la capa de aplicación que facilita la comunicación en la web mediante un modelo de solicitud-respuesta, utilizando TCP e IP dentro del modelo TCP/IP. Este protocolo es crucial para el funcionamiento de las aplicaciones web y las APIs, operando dentro de un marco que también se alinea con las capas del modelo OSI, donde TCP se encuentra en la capa 4 e IP en la capa 3. [34]

Cuando un usuario navega en internet ingresando una URL o cambiando de página, se inicia una conexión TCP/IP y se envía una solicitud HTTP al servidor como se observa en la Figura 18, que contiene detalles de la petición del usuario. El servidor responde con los datos solicitados en milisegundos. Aunque HTTP es esencial para el intercambio de datos en la web, no es seguro y puede ser vulnerable a interceptaciones y ataques DDoS en la capa 7. [34]



Figura 18. Protocolo HTTP [34]

1.3.7 Servidos LAMP

LAMP es un acrónimo que representa un conjunto de tecnologías de servidor compuesto por Linux, Apache, MySQL y PHP como se muestra en la Figura 19, esenciales para el desarrollo y alojamiento de aplicaciones web. Este stack permite desde la creación de sitios web hasta la realización de pruebas de páginas tanto dinámicas como estáticas. El conjunto de servicios interconectados facilita la configuración de plataformas de desarrollo a medida. Cada componente de LAMP juega un papel crucial: [35]

a. Linux

Actúa como el sistema operativo que soporta los demás componentes, cualquier distribución de Linux puede servir como la base. [35]

b. Apache

Es el servidor web encargado de gestionar y servir páginas web, tanto dinámicas ejecutadas en PHP como estáticas. [35]

c. MySQL

Se destaca como el sistema de gestión de bases de datos más utilizado, encargado de almacenar y gestionar los datos accesibles desde el servidor. [35]

d. PHP

Este lenguaje de programación dinámico facilita la creación de contenido interactivo en la web. [35]



Figura 19. Servidor LAMP

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema telemetrizado de carga inalámbrica utilizando tecnología inteligente para vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la Universidad Técnica de Ambato.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las deficiencias del sistema de carga actual destinado a los vehículos aéreos no tripulados (UAV) de la Universidad Técnica de Ambato.
- Diseñar la estación de carga inalámbrica integrando soluciones telemetrizadas que permitan el monitoreo remoto de la estación de carga.
- Construir una estación telemetrizada de carga inalámbrica mediante el uso de tecnología inteligente con el fin de incrementar la autonomía de vuelo en UAV.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Durante el desarrollo del proyecto investigativo, se seleccionaron e implementaron diversos equipos y materiales para la construcción de una estación de carga inalámbrica destinada a vehículos aéreos no tripulados (UAV). En las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 se proporciona un desglose detallado por etapas de todos los recursos utilizados para alcanzar dicho objetivo.

Tabla 7. Materiales para la carga inalámbrica

Materiales	Descripción	Imagen
Transmisor inalámbrico	Utilizado para rectificar AC/DC, inversor DC/AC 144 KHz, compensación y transmisión.	
Receptor inalámbrico	Utilizado para rectificar y regular el voltaje.	
Cable de cobre esmaltado AWG 18 y 15	Utilizado para realizar las bobinas que generan el campo magnético.	
Fuente de alimentación 24 V 2A	Utilizado para la alimentación de los módulos de carga inalámbrica.	
Balanceador de LiPo	Utilizado para el balanceo de carga de cada una de las celdas de la LiPo.	

Tabla 8. Materiales para la sensorización

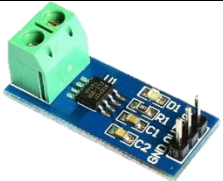
Materiales	Descripción	Imagen
Sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712	Utilizado para medir la corriente para alimentar el transmisor.	
Sensor de voltaje DC FZ0430	Utilizado para medir el voltaje que alimenta al trasmisor.	
Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo	Utilizado para medir la corriente en la bobina transmisora.	
ESP32	Utilizado para procesar los datos provenientes de los sensores.	

Tabla 9. Materiales para la comunicación

Materiales	Descripción	Imagen
Módulo de telemetría 3DR	Utilizado para la transmisión y recepción de datos a largas distancias.	

Tabla 10. Materiales adicionales

Materiales	Descripción	Imagen
Computadora	Utilizado para observar los datos en tiempo real en el servidor.	
UAV	Utilizado para realizar misiones y monitorear la batería.	

En la Tabla 11 se presenta un desglose de los softwares empleados en el desarrollo de este proyecto, detallando sus funciones y contribución al trabajo investigativo.

Tabla 11. Softwares

Softwares	Descripción	Imagen
Servidor LAMP	Utilizado para almacenar, procesar y presentar los datos recibidos del UAV y la estación de carga inalámbrica.	
Arduino	Utilizado para la programación de los módulos ESP32-LoRa transmisor y receptor. De igual manera para captar los datos de los sensores.	
Mission Planner/Ardupilot	Utilizado para la configuración del UAV.	
Fusion 360	Utilizado para el diseño de la estructura de la estación de carga.	
Proteus	Utilizado para simulación de los circuitos que intervienen en el transmisor y el receptor.	

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

El presente proyecto se llevó a cabo como una investigación aplicada, se enfocó en recopilar datos acerca de los métodos y tecnologías utilizadas en la transferencia de potencia inalámbrica para vehículos aéreos no tripulados (UAV). Incluyó la implementación de telemetría para medir magnitudes físicas que intervienen en el sistema y transmitir la información hacia un operador o dispositivo remoto.

Simultáneamente, se utilizó la modalidad de investigación bibliográfica con enfoque principal en la revisión y recopilación de información procedente de tesis, libros, artículos científicos, proyectos de investigación, datasheet de dispositivos y otras fuentes bibliográficas. Estos recursos se obtuvieron a través de bases de datos, bibliotecas virtuales, repositorios universitarios y páginas web de revistas científicas. Este enfoque permitió obtener conocimientos sobre los resultados de investigaciones previas relacionadas con las variables de estudio.

Dada la orientación eminentemente práctica de la investigación, también se utilizó la modalidad de investigación experimental. Esta modalidad se fundamenta en la necesidad de obtener información a través de procesos experimentales, los cuales surgieron como resultado directo de la implementación y validación del rendimiento del sistema.

2.2.2 Recolección de información

Con la finalidad de obtener información relevante para el avance del proyecto, se utilizó una variedad de fuentes confiables. Se realizó una investigación profunda en los repositorios de diversas universidades a nivel nacional e internacional, revistas científicas y libros. Se buscó orientación por parte del grupo de investigación y del docente tutor, así como de tesis relacionadas con sistemas de carga inalámbrica, aplicación de telemetría y autonomía en vehículos aéreos no tripulados (UAV's). En la Tabla 12 se muestra los criterios con su respectiva descripción para la recolección de información.

Tabla 12. Recolección de información

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Incrementar la autonomía de vuelo de vehículos aéreos no tripulados (UAV's) de la Universidad Técnica de Ambato.
¿De qué personas u objetos?	De los vehículos aéreos no tripulados de la Universidad Técnica de Ambato.
¿Cómo?	A través de la transferencia de potencias de forma inalámbrica.
¿Con qué?	Tecnologías de transmisión de energía.
¿Cuándo?	En el periodo académico marzo-agosto 2024
¿Dónde?	Universidad Técnica de Ambato

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

Con base en los datos recopilados, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Revisión de la data recolectada.
- Recopilación de información de tecnologías utilizadas para la transferencia de potencias de forma inalámbrica y sistemas de telemetría.
- Pruebas de validación técnica del sistema.
- Pruebas de funcionamiento en vehículos aéreos no tripulados de la Universidad Técnica de Ambato.
- Análisis de los datos obtenidos a través de la telemetría en el sistema de carga.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de la propuesta

El proyecto propone mejorar el sistema de carga para UAV's mediante la implementación de tecnología inalámbrica. Se aborda desde la identificación de problemas en el sistema tradicional hasta la selección de sensores, tecnología inalámbrica y diseño de la estructura. El resultado es un sistema eficiente, monitoreado y controlado remotamente, para potenciar la investigación y aplicación de drones en la Universidad Técnica de Ambato.

3.1.1 Descripción de los UAV's

Los UAV's están diseñados con materiales de alta calidad y resistencia, tales como la fibra de carbono y la aleación de aluminio que garantizan durabilidad y ligereza. Su plataforma de vuelo estable brinda la posibilidad de incorporar una amplia gama de sensores y equipos adicionales para diversas aplicaciones. Cuenta con un sistema de vuelo estable y preciso, debido a su electrónica de control de vuelo y la capacidad para integrar sistemas de navegación GPS, lo cual permite realizar vuelos autónomos y seguir rutas predefinidas con gran precisión.

3.1.2 Características Técnicas de los UAV's

Los UAV's seleccionados de la Universidad Técnica de Ambato representan una variedad de tecnología y aplicaciones prácticas en diversos campos como la agricultura de precisión, seguridad y desarrollo investigativo por parte del personal docente y estudiantil. Estos vehículos aéreos no tripulados (UAV's) abarcan diversas configuraciones y capacidades de acuerdo con los sensores y la tarjeta controladora de vuelo que sirve como componentes esenciales en el proceso de investigación y desarrollo. En la Tabla 13 se presenta un análisis detallado de las características técnicas y el rendimiento de los UAV's seleccionados. En el Anexo A, se presentan las pruebas de vuelo del UAV previo a la implementación de la carga inalámbrica.

Tabla 13. Características Técnicas de los UAV's

Características	Realacc x210Pro FPV	UAV multirotor
		
Peso	500 g	595 g
Dimensiones	300x260x100 mm	350x350x400 mm
Autonomía de vuelo	14.33 min	15 min
Velocidad máxima	20 Km/h	20 Km/h
Altura máxima de vuelo	122 m	120 m
Número de motores	4	4
Tipo de hélices	Gemfan 5130	KingKong Multirotor Propeller 6x4 CW/CCW
Sistema de navegación	GPS	GPS
Sensores	Acelerómetro Giroscopio Barómetro	Acelerómetro Giroscopio Barómetro
Sistema de batería	Lipo 1300 mAh 11.1 V 14.43 Wh 75 C 3s	Lipo 1300 mAh 11.1 V 14.43 Wh 75 C 3s
Material del marco	Fibra de carbono PLA	Fibra de carbono PLA

3.1.3 Sistema de carga tradicional

El procedimiento estándar de recarga para un UAV implica varios pasos técnicos y precauciones específicas para asegurar la integridad de los componentes y la eficacia del proceso.

Como se observa en la Tabla 14, inicialmente, se debe extraer la batería del UAV, desconectándola cuidadosamente para evitar daños en los conectores tipo XT60, que son susceptibles de deterioro durante las operaciones repetidas de conexión y desconexión.

Posteriormente, la batería se conecta a un cargador especializado, como el IMAX B6AC. Es crucial ajustar correctamente las configuraciones del cargador, incluyendo el amperaje, voltaje y el número de celdas de la batería, para iniciar el proceso de carga.

Este ajuste garantiza que la batería se cargue de manera óptima y segura, según sus especificaciones técnicas.

El tiempo total estimado para una carga completa es de 5540 segundos, equivalente a 92 minutos. Además, se estima entre 15 y 20 minutos en tomar el dron y trasladarlo hasta el punto donde se va a cargar la batería. Una vez completada la carga, el proceso se invierte: la batería se reinstala en el UAV. Es esencial realizar esta operación con la misma precaución inicial para evitar cualquier daño en los conectores. Finalmente, una vez que la batería está asegurada y conectada al UAV, este está listo para reanudar su misión conforme a la ruta previamente programada. En la Tabla 14 se presenta el tiempo en segundos por cada acción que se debe realizar en el sistema de carga tradicional. En la Figura 20 se puede observar la batería LiPo en un proceso de carga del modo tradicional.

Tabla 14. Sistema de carga tradicional

Acción	Tiempo (segundos)
Extraer la batería del dron	35
Poner la batería en el cargador	20
Conectar el cargador	15
Tiempo de carga	5400
Desconectar el cargador	15
Extraer la batería del cargador	20
Poner la batería en el dron	35
Total, de tiempo de carga de la batería	5540



Figura 20. Carga tradicional del UAV

3.1.4 Problemas identificados con el sistema de carga tradicional

- Tiempo de carga prolongado: Este problema se relaciona con el tiempo necesario para cargar completamente la batería. El método de carga tradicional puede llegar a ser lento, lo que significa que el dron no va a estar disponible para realizar las distintas actividades.
- Daños en puertos de carga: Los puestos de carga pueden llegar a dañarse con el uso repetido, la inserción y extracción frecuente del cable de carga provoca desgaste, lo cual puede provocar conexiones inestables y fallas en los puertos.
- Riesgo de daños por accidentes: Al estar conectados físicamente a una fuente de alimentación los drones tienden a daños por accidente, puede ser que alguien se tropiece con el cable de carga, lo cual va a provocar la caída del dispositivo y provocar daños severos.
- Sobrecarga de la batería: Aunque los dispositivos tienen sistemas integrados para prevenir la sobrecarga, la carga continua durante periodos prolongados, especialmente cuando la batería está cargada totalmente, puede disminuir la vida útil afectando la capacidad para una carga a largo plazo.
- Daños potenciales: El uso frecuente de cargadores de baja calidad o incompatibles puede generar sobrecalentamiento, lo cual pone en riesgo al dispositivo e incluso a su entorno generando en casos mayores hasta incendios.

3.1.5 Esquema general del sistema

El diseño del sistema telemetrizado de carga inalámbrica para UAV's se estructura en tres etapas: carga inalámbrica, que permite la transferencia de energía sin contacto físico; sensorización y comunicación, que facilitan la recolección y transmisión de datos en tiempo real; y almacenamiento y visualización de datos, que permiten el análisis y la interpretación de la información obtenida para optimizar el rendimiento operativo del UAV. En la Figura 21 se presenta el esquema general del sistema organizado por etapas, destacando la integración funcional y secuencia operativa del sistema.

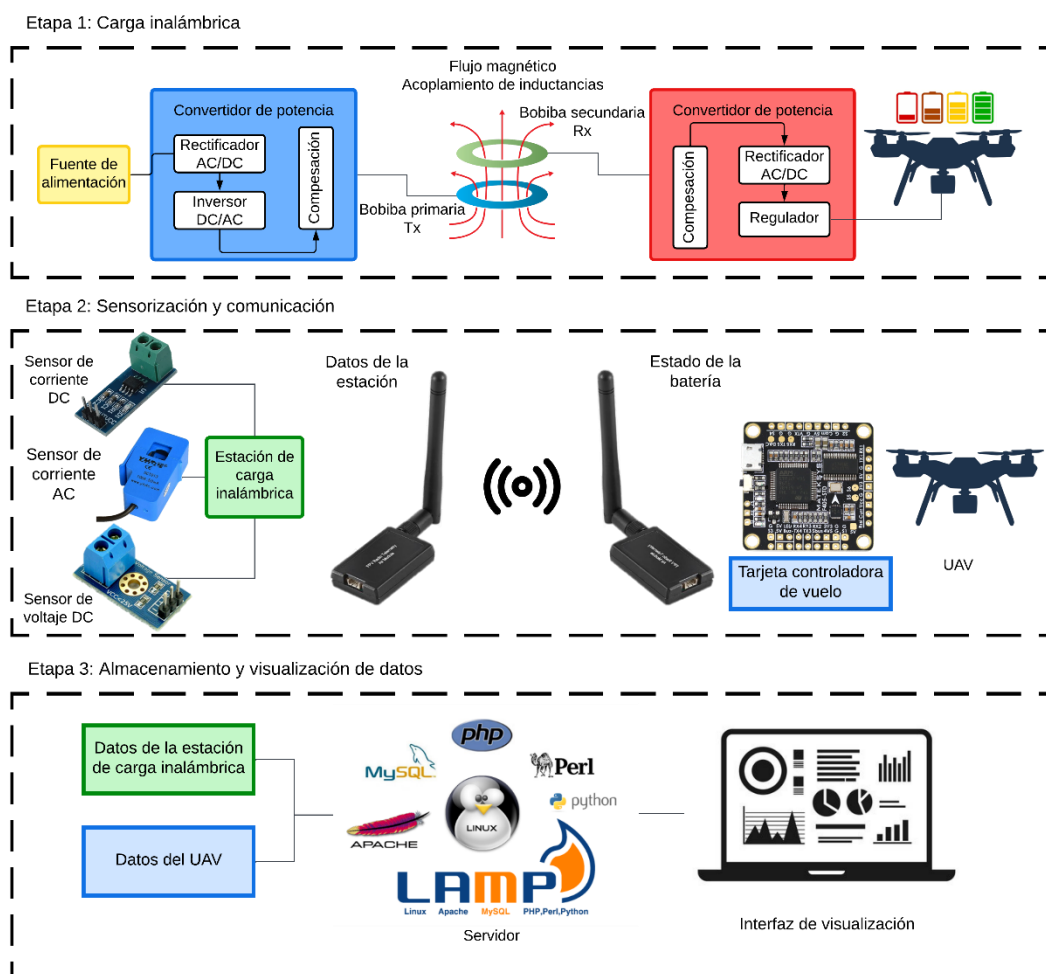


Figura 21. Esquema general del sistema

a. Etapa 1: Carga inalámbrica

La etapa de carga inalámbrica consiste en un sistema de transferencia de potencia inductivo (IPT). Consta de un transmisor que forma parte de la estación y un receptor que se encuentra instalado en el UAV. El transmisor utiliza un rectificador para convertir la corriente alterna (AC) suministrada por el tomacorriente en corriente directa (DC), luego mediante un inversor de frecuencia esta corriente DC se convierte nuevamente en AC, ajustada a una frecuencia de 144 KHz, esta energía pasa a través de un circuito de compensación, que optimiza la eficiencia del sistema generando un campo magnético en la bobina transmisora.

En el módulo receptor, la bobina secundaria capta la energía magnética generada por el transmisor para rectificarla en corriente directa y finalmente ser regulada a 12 voltios para cargar la batería de polímero de litio (LiPo) que alimenta al UAV.

b. Etapa 2: Sensorización y comunicación

La etapa de sensorización y comunicación se implementa en la estación y en el receptor ubicado en el UAV. En la estación de carga se utilizan sensores de corriente directa (DC) como de corriente alterna (AC), junto con un sensor de voltaje (DC). Estos dispositivos captan las señales eléctricas que intervienen en el transmisor de carga. La información obtenida por los sensores es procesada en el módulo ESP32 que envía los datos con ayuda del protocolo MQTT directamente al servidor y a la base de datos desarrollada en MySQL.

En el UAV, los datos procedentes de los sensores integrados se recopilan mediante la tarjeta controladora de vuelo. Para la comunicación del UAV con la estación de carga se implementó en la Raspberry Pi y en el UAV módulos de telemetría para UAV 3DR de 500 mW.

c. Etapa 3: Almacenamiento y visualización de datos

La etapa de almacenamiento y visualización de datos implica la centralización de la información procedente de la estación de carga y del UAV en un servidor LAMP. Este servidor está configurado con una serie de tecnologías integradas: un sistema operativo con base Linux, el servidor web Apache para gestionar las solicitudes HTTP, MySQL como base de datos para el almacenamiento estructurado de la información y lenguajes de programación como PHP, Python o Perl que se utilizan para el procesamiento de los datos. La información procesada es presentada en un dashboard, que actúa como interfaz de usuario final, con una visualización clara y accesible de los datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones y el monitorio continuo de las operaciones del sistema.

3.1.6 Selección de los elementos de hardware para el sistema telemetrizado de carga inalámbrica

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los distintos componentes de hardware que integran el sistema telemetrizado de carga inalámbrica. Por lo cual, se elaboraron tablas comparativas que permitieron evaluar las características técnicas de cada dispositivo. Este método facilitó la identificación y selección de los componentes que

ofrecen las mejores especificaciones técnicas, optimizando así el rendimiento y la eficiencia del sistema desarrollado.

a. Módulo transmisor y receptor de carga inalámbrica

Los módulos de transferencia de energía inductiva son el componente principal de la estación de carga inalámbrica. El módulo transmisor se encarga de generar una señal de corriente alterna AC a 144 KHz para que la energía sea transmitida por un campo magnético al receptor, este se encarga de captar la energía y regularla a la salida en energía de corriente continua (DC).

Tabla 15. Módulos de transmisión y recepción inalámbricos

Módulo	Detalle	Ilustración
Transmisor	Voltaje de entrada: 24V Corriente de entrada: Máx 3A Dimensiones: 16.99 mm x 29.99 mm Frecuencia de operación en la bobina: 144 KHz	
Receptor	Voltaje de salida: 12V Corriente de salida: Máx 3A Potencia máxima de salida: 36 W Dimensiones: 29.99 mm x 54.00 mm Frecuencia de operación en la bobina: 144 KHz	

b. Cable de cobre esmaltado

El cable de cobre esmaltado es fundamental en la fabricación de bobinas que generan energía magnética, facilitando así sistemas de carga inductiva y sin contacto en UAV. Este tipo de cable se caracteriza por su revestimiento aislante mismo que previene el riesgo de cortocircuitos, facilitando la transferencia de energía y mejorando la autonomía del UAV.

Tabla 16. Tabla comparativa de los calibres 15,16 y 18

Características	Calibre 15	Calibre 16	Calibre 18
Diámetro (mm)	1.45	1.29	1.02
Resistencia (Ω/m)	0.0126	0.0158	0.0201
Capacidad de corriente (A)	7.5	5.5	3.7
Peso por metro (g/m)	13.1	10.4	8.2
Sección transversal (mm^2)	1.62	1.30	0.82
Amperaje soportado (A)	Aprox. 21	Aprox. 17	Aprox. 13
Maleabilidad	Menor	Moderada	Mayor

Después de revisar las especificaciones técnicas de los cables de cobre esmaltado de los calibres 15, 16 y 18, se concluye que el calibre 15 es la opción más adecuada para la fabricación de las bobinas destinadas a aplicaciones que requieren una eficiente transmisión de energía eléctrica y robustez, como es el caso del UAV.

c. Fuente de alimentación

El módulo transmisor de energía requiere de un voltaje de entrada de 24 voltios, la corriente se selecciona en función de la batería de polímero de litio que se encarga de alimentar al dron, estas manejan una corriente de 1.3 amperios, se requiere de una fuente con una mayor corriente para lograr cargar la batería con éxito y de forma rápida y eficiente.

Tabla 17. Fuente de alimentación

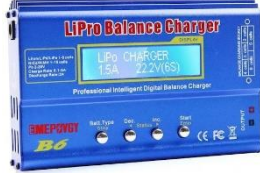
Fuente de alimentación	Detalle
	Entrada de CA con punta de CC Voltaje de entrada: 110V Voltaje de salida: 24 V Corriente máxima de salida: 2A Potencia de salida: 48 W Montaje: Soporte de pared Color: negro

d. Balanceador de LiPo

En el mercado existe una gran diversidad de cargadores de batería de tipo LiPo con la característica de que se encargan de balancear la carga para un mayor tiempo de vida de la batería y el cuidado de cada celda que la conforma. En la Tabla 18 se muestra

una comparación de tres distintos balanceadores de carga para baterías LiPo con capacidad para distintos números de celdas.

Tabla 18. Balanceadores de carga en baterías LiPo

Características	IMAX B6 AC/DC	BC-4S15D	IMAX-BP1008D
			
Voltaje de entrada	DC: 11 – 18 V	DC: 9 – 16 V	DC: 10 – 20 V
Potencia de carga	50 W	25 W	10 W
Corriente de carga	0.1 – 5 A	1500 mA	800 mAh
Número de celdas	1 – 6 celdas	2 – 4 celdas	2 – 3 celdas
Dimensiones	133 x 87 x 33 mm	80 x 50 x 20 mm	68 x 47 x 20 mm
Material	Aluminio	Aluminio	Plástico
Indicador de carga	Visual y auditivo	Visual y auditivo	Visual
Programa	Manual	Automático	Automático
Peso	277 g	95 g	74 g

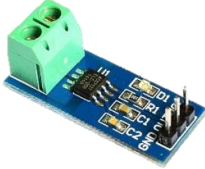
Para carga de manera eficiente la batería de los UAV's que es de 3 celdas se seleccionó el cargador balanceador modelo IMAX-BP1008D, debido a que presenta las características requeridas para una carga balanceada de las baterías que alimentan a los UAV's previamente seleccionados. Su estructura de plástico es ideal debido a que de esta forma no genera pérdidas en el campo magnético generado en la transferencia de energía inductiva. Su menor peso y tamaño en comparación con los otros balanceadores es ideal para no generar inestabilidad en el UAV y necesitar un menor espacio para su instalación en la estructura.

e. Sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712

El sensor de corriente ACS712 de 5A se utilizó para la medición de corriente continua que se proporciona a la estación de carga inalámbrica, los sensores basados en el efecto Hall ofrecen aislar completamente la carga del sensor. El aislamiento es crucial en aplicaciones que demandan protección eléctrica y evita la disipación de energía a través de las pérdidas por efecto Joule. Los datos proporcionados por este sensor son esenciales para determinar el consumo generado por la estación de carga inalámbrica y su comparación con el sistema de carga tradicional por cables. En la Tabla 19 se

detallan más características del sensor. En el Anexo B se muestra el esquema de conexión del sensor.

Tabla 19. Características del sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712

Sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712	Detalle
	Voltaje de alimentación: 5VDC Rango de sensado de corriente: -5A a +5A Ancho de banda máximo: 80 KHz Rango de salida analógica: 1.575V a 3.425V Sensibilidad: 185 mV/A Offset de salida: 2.5V

f. Sensor de voltaje FZ0430

El sensor de voltaje complementa al sensor de corriente directa en la estación para realizar el cálculo de la potencia de consumo en vatios generado por la estación. En la Tabla 20 se muestra el sensor de voltaje utilizado con sus respectivas características. El formato de los pines de conexión del sensor de voltaje se puede visualizar en el Anexo B.

Tabla 20. Características del sensor de voltaje

Sensor de voltaje FZ0430	Detalle
	Rango de entrada de voltaje VCC: DC 0-25V Rango de detección de voltaje VCC: DC 0.02445V-25V Tipo de salida: Analógica Voltaje detección entrada máximo: 25V o 16.5V

g. Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo

Este dispositivo presentado en la Tabla 21 está diseñado para medir la cantidad de corriente alterna que fluye a través de un conductor sin necesidad de modificar el circuito o hacer contacto directo. Funciona utilizando el principio del efecto Hall, permite realizar mediciones seguras y precisas, siendo ideal para aplicaciones de monitoreo eléctrico. Este sensor se implementó conectado a un cable que se conecta en el tomacorriente para obtener el valor total de la corriente que consume la estación en su totalidad para ser registrado en el dashboard y la base de datos. Este dato además permite calcular el consumo general de la estación de carga inalámbrica en vatios para

ser comparado con el sistema de carga tradicional. Para la conexión del sensor se lo complementa con el módulo ADS1115 como se detalla en el Anexo B.

Tabla 21. Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo

Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo	Detalle
	Entrada nominal: (0-15) A Salida nominal: (0-1) Vrms Voltaje de operación: 660V Material del núcleo: Ferrita Frecuencia: 50Hz – 1KHz Temperatura de funcionamiento -25°C a 70°C Peso: 70g

h. Tarjeta de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se realizó un análisis de distintos módulos de a los que se pueden conectar sensores. Los módulos más utilizados en telemetría son ESP8266/Wemos, ESP32 y Arduino UNO. En la Tabla 22 se presenta una comparativa entre los módulos anteriormente mencionados.

Tabla 22. Comparación entre módulos de comunicación

Características	WemosD1	ESP32	Arduino UNO
			
Microcontrolador	ESP8266	Tensilica LX6 dual – core	ATmega328P
Frecuencia de CPU	80 MHz (hasta 160 MHz)	Hasta 240 MHz	16 MHz
Conectividad	Wi-Fi	Wi-Fi, Bluetooth (Classic + BLE)	No incorporado
Voltaje de Operación	3.3 V	3.3 V y 5 V	5 V
Memoria SRAM	80 KB	520 KB	2 KB
I/O Digitales	11	34	14
I/O Analógicos	1 ADC (1 canal)	18 ADC (18 canales)	18 ADC (18 canales)
Memoria Flash	4 MB	Hasta 16 MB	32 KB
EEPROM	80 KB	520 KB	2 KB
Puerto USB	Sí	Sí	Sí
Precio aproximado	\$3 – \$6 USD	\$5 – \$10 USD	\$20 – \$25 USD

Debido a su antena Wi-Fi para conexión inalámbrica y la gran cantidad de pines con los que cuenta, el ESP32 es el módulo ideal para la obtención de datos de los sensores que se encuentran en la estación de carga y la utilización del protocolo MQTT para su publicación en el servidor Grafana de forma directa. El diagrama de la ESP32 se encuentra en el Anexo C.

i. Microcomputadora para el servidor

Para el servidor fue necesario seleccionar una microcomputadora que admita la instalación del sistema operativo Linux. Entre las opciones consideradas se tiene a la Raspberry pi 4, ODROID-C4 y Banana Pi M4 son las opciones más populares que difieren en característica sus capacidades, cada una de estas cuentan con sus propias ventajas para la configuración del servidor. En la Tabla 23 se muestra una comparación entre las microcomputadoras mencionadas anteriormente.

Tabla 23. Microcomputadoras

Características	Raspberry Pi 4	ODROID-C4	Banana Pi M4
			
Procesador	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 1.5GHz	Analogic S905x3, Quad core Cortex-A55 2.0GHz	Realtek RTD1395, Quad core Cortex-A53
RAM	2GB, 4GB o 8GB LPDDR4	4 GB DDR4	1 GB DDR4
Conectividad	Gigabit Ethernet, Wi-Fi, 802.11ac, Bluetooth 5.0	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac (opcional)	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 4.2
Almacenamiento	Tarjeta microSD	Tarjeta microSD, eMMC (opcional)	eMMC (8-64 GB), Tarjeta microSD
Salida de video	2x micro HDMI, hasta 4K 60Hz	HDMI 2.0, hasta 4K 60Hz	HDMI, hasta 4K 30Hz
Precio aproximado	\$35 – \$75 USD	\$50 - \$60 USD	\$38 USD aproximadamente
Uso recomendado	Proyectos generales de IoT, centros de multimedia, aprendizaje de programación	Proyectos multimedia, juegos, aplicaciones que requieran alto rendimiento de CPU	Proyectos IoT, centros multimedia caseros

En el contexto de configurar un servidor LAMP, la Raspberry Pi 4 es la opción destacada gracias a su robusto soporte de hardware, flexibilidad en la configuración de la memoria RAM, presencia de un procesador capaz, se adapta excepcionalmente bien para manejar las cargas de trabajo de un servidor web. Una de las ventajas más significativas de la Raspberry Pi 4 es su compatibilidad con Raspberry Pi OS, un sistema operativo basado en Debian optimizado específicamente para la Raspberry Pi.

Este sistema operativo no solo asegura una integración fluida con el hardware, sino que también ofrece un entorno estable y seguro para ejecutar un servidor LAMP. Además, la comunidad extensa y activa de Raspberry Pi proporciona guías y soporte que es muy importante para la solución de problemas.

j. Comunicación

Para el sistema de comunicación entre el UAV y el servidor se realizó una tabla comparativa de módulos de telemetría específicos para UAV existentes en el mercado. La Tabla 24 muestra una comparativa entre módulo ESP32, 3DR y LoRa.

Tabla 24. Tabla comparativa de módulos de telemetría para UAV

Características	ESP32	3DR	LoRa
			
Frecuencia de operación	2.4 GHz	915 MHz / 433 MHz	433 MHz / 868 MHz / 915 MHz
Protocolo de comunicación	Wi-Fi, Bluetooth, UART	MAVLink (UART)	LoRaWAN, LoRa
Rango de alcance	Hasta 200 m	Hasta 10 Km	Hasta 15 – 20 Km (en función del entorno)
Velocidad	Hasta 150 Mbps	250 kbps	0.3 – 50 kbps
Consumo de energía	160 – 240 mA	100 – 200 mA	10 – 30 mA
Integración con drones	Alta flexibilidad (DIY)	Alta compatibilidad con Pixhawk / APM / Matek	Moderada
Precio	\$5 - \$10	\$40 - \$70	\$25 - \$35
Facilidad de uso	Moderada (requiere programación)	Alta (plug and play)	Moderada (requiere configuración)

Luego de analizar los parámetros mostrados en la Tabla 24 con respecto a los módulos de telemetría para la obtención de datos del UAV. Se seleccionó los módulos 3DR debido a su mayor flexibilidad para el uso en drones, la distancia de comunicación de hasta 10 km es suficiente para la aplicación que realizan los UAV de la Universidad Técnica de Ambato, su frecuencia de operación de 915 MHz en comunicación RF, utiliza el protocolo de comunicación MAVLink que permite su compatibilidad con lenguajes de programación como Python y PHP a través de librerías desarrolladas por la comunidad y la compatibilidad con placas controladoras de vuelo convierten a los módulos 3DR en la opción ideal.

3.1.7 Software para el sistema telemetrizado de carga inalámbrica

Se realizó una selección del software adecuado para el cumplimiento del proyecto. Se desarrollo simulación de circuitos electrónicos, comportamiento de flujo de campo magnético, programación de dispositivos de comunicación, tratamiento de señales y finalmente los requerimientos necesarios para su posterior publicación en un dashboard. También se utilizó un software para la planificación de trayectorias y configuración del UAV.

a. Servidor LAMP

El servidor LAMP se utilizó para el almacenamiento, procesamiento y publicación de los datos proporcionados por la estación de carga y el UAV. El servidor LAMP tiene una configuración de sistema operativo con base Linux, servicio web de Apache, base de datos de Mysql y finalmente lenguajes de programación como PHP, Python o Perl. Se utilizó el protocolo MQTT para la publicación de los datos en tiempo real.

b. Arduino IDE

El IDE de Arduino sirve para la programación del dispositivo ESP32, a este se conectaron los sensores y se encarga de la adquisición y envío de los datos por MQTT y a la base de datos. Este IDE cuenta con una gran variedad de librería que facilitan la programación de la ESP32, además proporciona una salida de los errores que se presentan en la compilación del archivo antes de ser cargado a la tarjeta de adquisición de los datos.

c. Ardupilot / Mission Planner

Ardupilot / Mission Planner se implementó para la configuración de la tarjeta controladora de vuelo que permite una mayor estabilidad, como se indica en el Anexo D. El software permite la planeación de trayectorias en puntos específicos con tecnología GPS. La placa pixhawk 2.4.8 puede ser configurada para proporcionar datos específicos de PID de los motores, estado de la batería, del sensor acelerómetro, entre otros.

d. Fusion 360

El software Fusion 360 se utilizó para el diseño de la estructura de la estación de carga inalámbrica. Es un software dedicado al diseño y modelado 3D que se generalmente utilizado en fabricación, simulación y análisis, con herramientas avanzadas para modelar piezas y ensamblajes complejos.

e. Proteus

Se empleo Proteus en el desarrollo del esquemático de los circuitos que intervienen en el proceso de carga, el diseño de la placa PCB y el comportamiento de las señales previo a su construcción. Este software tiene una gran capacidad con una basta librería de componentes activos y pasivos requeridos para el diseño de circuitos.

3.1.8 Sistema de carga inalámbrica

En este apartado se aborda el sistema de carga inalámbrica, centrándose en aspectos técnicos clave. Se inicia con la definición de los parámetros iniciales que guían el diseño del sistema. A continuación, se detalla el diseño de las bobinas, esenciales para la eficiencia de la transferencia de energía.

Se procedió con la experimentación y optimización de bobinas, seguido de la selección meticulosa del cableado para la fabricación de estas. Se finaliza con pruebas de funcionamiento que validan la operabilidad del sistema.

a. Parámetros iniciales

Para el proceso de carga es fundamental establecer los parámetros iniciales adecuados que se utilizan para la batería LiPo de 3 celdas con una capacidad mínima de 1300 mAh. El voltaje nominal de la batería es de 11.1V y su potencia de 14.43 Wh. Además, es esencial considerar los límites de voltaje para evitar daños: el mínimo por celda es de 3.3 voltios, sumando un total de 9.9 voltios para la batería completa, mientras que el máximo es de 4.2 voltios por celda, alcanzando un total de 12.6 voltios.

La fuente de alimentación de carga de la batería de polímero de litio debe tener un voltaje superior al nominal para evitar errores en el voltaje de entrada y la corriente debe ser igual o mayor para garantizar la integridad de la batería.

Considerando estos aspectos, se ha determinado que el sistema de transferencia de potencia inductiva debe generar un campo magnético suficientemente fuerte para permitir que la captación y el procesamiento de la energía produzcan un mínimo de 12 V y 2 A, garantizando una carga efectiva y segura.

Tabla 25. Parámetros para la carga de la batería LiPo

Parámetro	Valor	Descripción
Tipo de batería	LiPo	Batería de Polímero de Litio
Configuración	3S	Tres celdas conectadas en serie
Capacidad	1300 mAh	Capacidad mínima de la batería
Voltaje nominal	11.1 V	Voltaje estándar para operación segura
Potencia	14.43 Wh	Energía disponible en la batería
Voltaje mínimo	9.9 V	Voltaje mínimo seguro (3.3 V por celda)
Voltaje máximo	12.6 V	Voltaje máximo seguro (4.2 V por celda)
Voltaje de carga	> 11.1 V	Voltaje de entrada recomendado para evitar errores

b. Diseño de las bobinas

Para el sistema de transferencia de potencia inalámbrica se realizó teniendo en cuenta criterios eléctricos específicos y consideraciones geométricas para su integración óptima tanto en la estación de carga como en el UAV. Los criterios eléctricos están restringidos por las características específicas con las que está construida la batería que alimenta al dron y la frecuencia de operación de trabajo, estas características se listan a continuación: voltaje de la batería $V_{bat} = 11.1 V$, corriente de carga de la batería $I_{bat} = 1.3 A$ y la potencia requerida $P_{bat} = 14.43 W$

En el receptor debe existir un rectificador AC/DC y luego un regulador de carga para conectar a la batería ya que si se conecta directamente con el sistema de transferencia de potencia inalámbrico recibiría corriente alterna para su alimentación generando daños en el sistema de alimentación del UAV. Como consecuencia la resistencia en el receptor se puede estimar calculando la resistencia de la batería:

$$R_{eq} = \frac{V_{bat}}{I_{bat}} \quad (16)$$

Reemplazando valores en la Ecuación (16) se tiene como resultado una resistencia equivalente de la batería de 8.53Ω , esta resistencia se determinó teniendo en cuenta un nivel medio de carga de la batería. No obstante, la resistencia equivalente que se somete a cambios en función de su uso, desde su carga completa a una descarga total, no afectan de forma significativa en los parámetros eléctricos del sistema. Por lo que se fija la resistencia equivalente en $R_L = 0.81 * R_{eq}$, resultando en $R_L = 6.90\Omega$.

Otro parámetro importante para definir en el sistema de carga es la frecuencia de operación del sistema, de acuerdo con la Tabla 6 para aplicaciones de niveles de potencia que oscilan entre 5 y 120 vatios se aplica el estándar de carga inalámbrica Qi en el que se especifica el uso de frecuencias entre 80 y 300 KHz.

Al comparar los módulos XKT-801, XKT-803, TIDA-00678 y BQ51003, el XKT-801 se destaca como una opción equilibrada y eficaz para proyectos de carga inalámbrica debido a su combinación de compatibilidad, facilidad de integración, rango de voltaje de entrada de 12V a 24V, corriente de salida de hasta 3A, y potencia de salida de hasta 48W.

El TIDA-00678, con un rango de voltaje de entrada de 12V a 24V y una eficiencia del 90%, está diseñado para aplicaciones más específicas y complejas, mientras que el BQ51003, con un rango de voltaje de entrada de 4.5V a 5.5V y una eficiencia del 93%, es ideal para dispositivos portátiles debido a su tamaño compacto.

Aunque el XKT-801 no tiene la máxima eficiencia del TIDA-00678 o BQ51003, su eficiencia del 80% es adecuada para la mayoría de las aplicaciones, y su tamaño compacto junto con su documentación ampliamente disponible lo hacen ideal para proyectos donde la simplicidad y la fiabilidad son prioritarias. [36]

De acuerdo con [36] y [37] el chip XKT-801 se ha utilizado en función de cargar vehículos aéreos no tripulados, es un chip que cumple con el funcionamiento de suministro de energía inalámbrica con resonancia de alta frecuencia y una potencia elevada. El módulo transmisor de Figura 22 que utiliza como componente central el chip XKT-801 requiere de una fuente de alimentación de 24 voltios y hasta un máximo de 3 Amperios, el valor de la corriente puede variar en función de las necesidades de energía que se desea obtener y regular en el receptor.

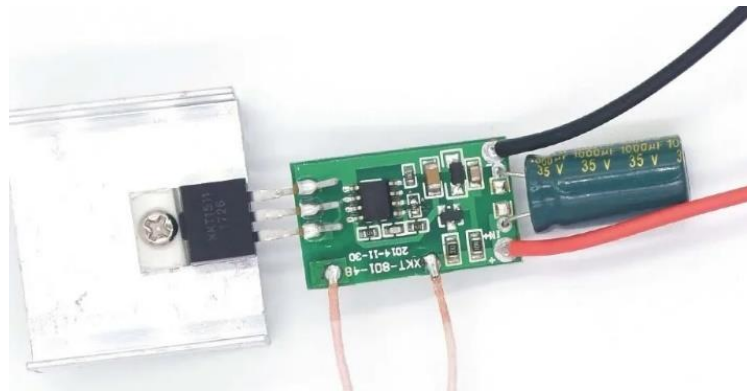


Figura 22. Módulo transmisor XKT-801

Dentro del módulo transmisor se tiene un inversor de alta frecuencia a 144 KHz para convertir la señal de corriente directa DC proporcionada por la fuente de 24 voltios en señal corriente alterna AC con una frecuencia de operación que oscila entre los 144 y 145 KHz para que la bobina genere un campo magnético y permitir la transferencia de energía [38]. En la Figura 23 se muestra el esquemático del módulo transmisor.

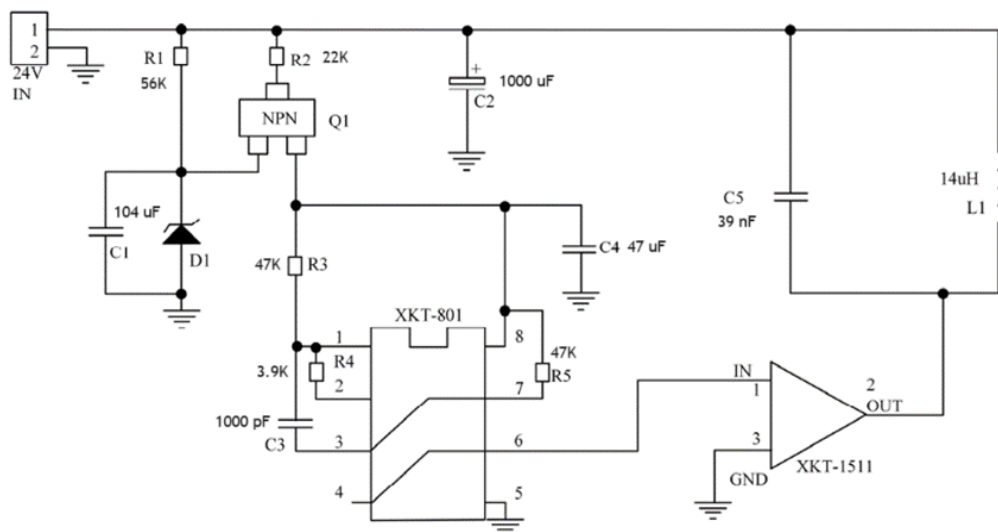


Figura 23. Esquemático del módulo transmisor XKT-801 [38]

Este módulo propone una bobina con una inductancia de 14 micro Henrios (uH) para la generación del campo magnético. Este valor se alcanzó en función de los parámetros geométricos de la bobina, se definió el formato de bobina circular plana, un diámetro externo (d_{out}) de 81.99 milímetros (mm) y diámetro interno (d_{in}) de 29.99 (mm) y la experimentación con cables de calibre (AWG) 15 y 18. Aplicando la Ecuación (12):

$$L = 31.33\mu_0 N^2 \frac{a^2}{8a + 11c}$$

Donde,

$$\begin{aligned} a &= \frac{d_{in} + d_{out}}{4} = \frac{0.02999 + 0.08199}{4} = 0.027995m \\ c &= \frac{d_{out} - d_{in}}{2} = \frac{0.08199 - 0.02999}{2} = 0.026m \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \\ L &= 14 \text{ uH} \end{aligned}$$

Con todos esos valores conocidos se despeja N que es el número de vueltas en la Ecuación (12), dando como resultado:

$$N = \sqrt{\frac{L(8a + 11c)}{31.33\mu_0 a^2}} \quad (17)$$

Resolviendo:

$$N = \sqrt{\frac{14 \times 10^{-7} (8(0.027995) + 11(0.026))}{31.33 \times 4\pi \times 10^{-7} \times (0.027995)^2}} = 15.21 \approx 15 \text{ vueltas}$$

Así la bobina para el módulo transmisor queda definida una bobina circular plana con un valor de 14 micro Henrios y 15 vueltas para realizar las pruebas de experimentación con los cables de calibre 15 y 18.

En el módulo receptor el chip XKT-3170 se encarga de captar la energía con una bobina con una inductancia igual a la del transmisor. El módulo de la Figura 24 que contiene el chip XKT-3170 se encarga de convertir la energía electromagnética captada por el inductor en corriente directa proporcionando una salida de 12 voltios hasta 3 amperios con ayuda de un conversor de corriente alterna AC a corriente directa DC, cumpliendo así con los requerimientos del sistema.



Figura 24. Módulo receptor XKT-3170

Para el módulo receptor la consideración para el diseño de la bobina receptora es con una construcción similar a la del módulo transmisor, manteniendo las características geométricas, el valor de la inductancia y el número de vueltas. En la Figura 25 se muestra el esquemático del módulo receptor.

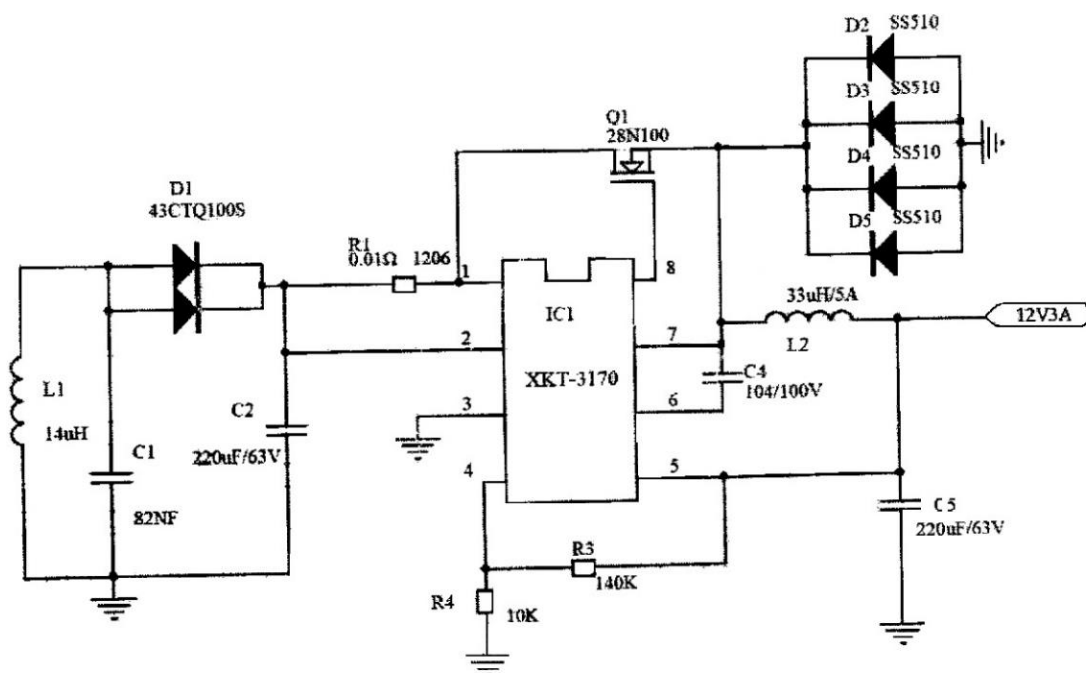


Figura 25. Esquemático del módulo receptor XKT-3170

Con los parámetros definidos se realizó la construcción de bobinas con calibres 18 y 15 para la experimentación y registro del rendimiento de cada prueba.

c. Selección del cable para la construcción de las bobinas

Seleccionar el cable adecuado para la construcción de bobinas es un paso crítico en el diseño de dispositivos eléctricos, ya que afecta tanto la eficiencia como el rendimiento. Al considerar el cable Litz y el cobre esmaltado, ambos con un AWG 15, es fundamental comprender sus propiedades únicas para tomar una decisión.

Basado en la Tabla 36 y en la Tabla 39 se comparó el rendimiento de las bobinas construidas con cable Litz y cobre esmaltado, a diferentes separaciones entre la bobina transmisora y la receptora. De esto se concluyó que las bobinas desarrolladas con cable Litz, tanto en el transmisor como en el receptor, ofrecen una mayor eficiencia en función de la distancia, pues con una separación mínima de 5 mm y un alcance máximo de 35 mm se obtiene un voltaje el voltaje necesario para la carga de la batería LiPo que alimenta al UAV.

En la Tabla 26 se muestra características específicas de los tipos de cable utilizados en la experimentación, mostrando una superioridad del cable Litz.

Tabla 26. Comparación del cable Litz y Cobre

Características	Cable Litz	Cable de Cobre Esmaltado
Composición	Muchos hilos de cobre finos, aislados individualmente	Hilo único de cobre con recubrimiento esmaltado
Aplicación	Frecuencias altas, como en bobinas y transformadores de alta frecuencia	Aplicaciones de baja y media frecuencia
Frecuencia	Más eficiente en altas frecuencias (50KHz – 1Mhz)	Más eficiente en bajas frecuencias (<50 KHz)
Pérdidas de corriente Eddy	Reducidas debido a múltiples hilos	Aumentan con el grosor del conductor
Eficiencia en HF	Alta, debido a la reducción del efecto pelicular	Baja, debido al mayor efecto pelicular
Flexibilidad	Alta, debido a los hilos finos	Media, depende del grosor del conductor
Aislamiento	Cada aislamiento tiene aislamiento individual	Recubrimiento esmaltado en la superficie externa

De la tabla comparativa, se concluyó que el cable Litz es el más adecuado para aplicaciones de alta frecuencias debido a su diseño con múltiples hilos finos, cada uno aislado individualmente. Esta construcción reduce el efecto pelicular y las pérdidas por corrientes Eddy, haciendo que el cable Litz sea más eficiente en el manejo de altas frecuencias.

Por otro lado, el cable de cobre esmaltado es más económico y tiene una buena eficiencia en aplicaciones de baja frecuencias, aunque sufre más pérdidas a frecuencias más altas debido al mayor efecto pelicular.

En conclusión, para la construcción de bobinas para aplicaciones de alta frecuencias en este caso de 144 KHz, el cable Litz es la mejor opción debido a su alta eficiencia y baja pérdida.

3.1.9 Implementación del sistema de telemetría

Para la implementación del sistema de telemetría robusto y efectivo se aplicó los sensores al sistema de carga con su respectiva tarjeta de adquisición de datos y un servidor LAMP, el protocolo MQTT y Grafana, se configuró una infraestructura capaz de recoger, almacenar y visualizar datos de sensores en tiempo real.

a. Instalación del servidor LAMP

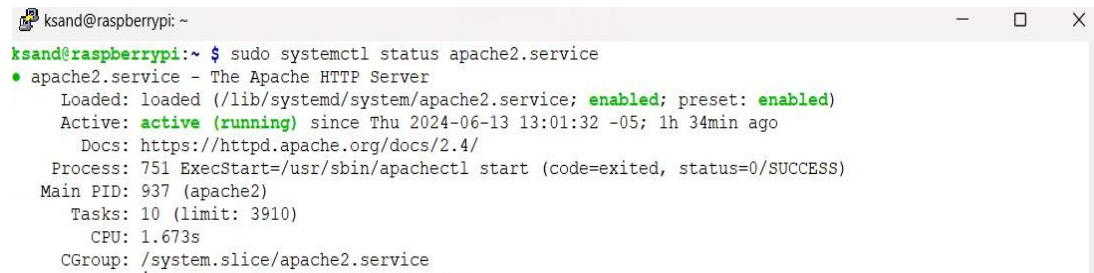
El servidor se configuró con una pila LAMP a partir del sistema operativo con base Linux, específicamente la distribución Raspbian OS diseñada para Raspberry pi. Está configurado con un servicio web de Apache que es de código abierto, esta herramienta facilita la entrega de contenido web a los usuarios de una red. La instalación de este servicio se realizó con los siguientes comandos:

```
sudo apt update
sudo apt upgrade
sudo apt install apache2
```

Se inicializó y se configuró el servicio para que este activo en cada arranque del servidor. También se verificó que el servidor se encuentre en estado activo y funcionando sin errores. Estos procedimientos se ejecutaron mediante los siguientes comandos:

```
sudo systemctl start apache2.service
sudo systemctl enable apache2.service
sudo systemctl status apache2.service
```

Se obtuvo la respuesta del comando `sudo systemctl status apache2.service`, el cual se presenta en la Figura 26.



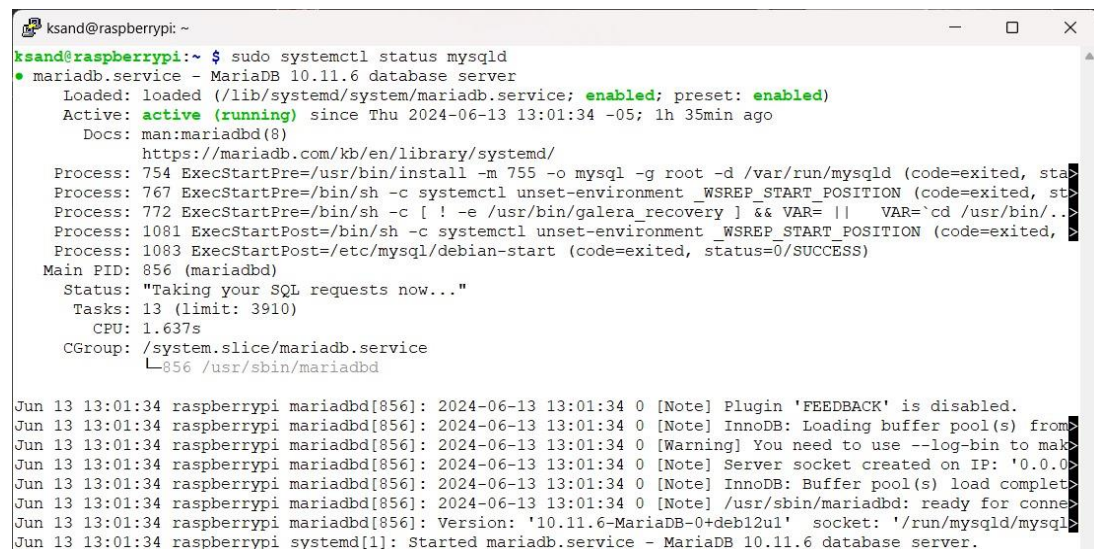
```
ksand@raspberrypi: ~  
ksand@raspberrypi:~$ sudo systemctl status apache2.service  
● apache2.service - The Apache HTTP Server  
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/apache2.service; enabled; preset: enabled)  
   Active: active (running) since Thu 2024-06-13 13:01:32 -05; 1h 34min ago  
     Docs: https://httpd.apache.org/docs/2.4/  
  Process: 751 ExecStart=/usr/sbin/apachectl start (code=exited, status=0/SUCCESS)  
 Main PID: 937 (apache2)  
    Tasks: 10 (limit: 3910)  
       CPU: 1.673s  
   CGroup: /system.slice/apache2.service
```

Figura 26. Servidor Apache activo

Luego se instaló y se configuró el servicio de base de datos MySQL. Como sistema de gestión de bases de datos relacional que utiliza el lenguaje SQL para la manipulación eficiente de datos que permite operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar, Eliminar), gestión de usuarios. Su versatilidad facilita la integración con varios lenguajes de programación y plataformas. La instalación y puesta en marcha de MySQL se realizó con los siguientes comandos.

```
sudo apt install default-mysql-server  
sudo mysql_secure_installation  
sudo systemctl enable mysql  
sudo systemctl status mysql
```

Al finalizar los pasos de instalación se verifica el funcionamiento de servicio como se muestra en la Figura 27.



```
ksand@raspberrypi: ~  
ksand@raspberrypi:~$ sudo systemctl status mysqld  
● mariadb.service - MariaDB 10.11.6 database server  
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mariadb.service; enabled; preset: enabled)  
   Active: active (running) since Thu 2024-06-13 13:01:34 -05; 1h 35min ago  
     Docs: man:mariadb(8)  
           https://mariadb.com/kb/en/library/systemd/  
  Process: 754 ExecStartPre=/usr/bin/install -m 755 -o mysql -g root -d /var/run/mysqld (code=exited, sta  
  Process: 767 ExecStartPre=/bin/sh -c systemctl unset-environment _WSREP_START_POSITION (code=exited, st  
  Process: 772 ExecStartPre=/bin/sh -c [ ! -e /usr/bin/galera_recovery ] && VAR= || VAR=`cd /usr/bin/..  
  Process: 1081 ExecStartPost=/bin/sh -c systemctl unset-environment _WSREP_START_POSITION (code=exited, >  
  Process: 1083 ExecStartPost=/etc/mysql/debian-start (code=exited, status=0/SUCCESS)  
 Main PID: 856 (mariabdd)  
   Status: "Taking your SQL requests now..."  
    Tasks: 13 (limit: 3910)  
       CPU: 1.637s  
   CGroup: /system.slice/mariadb.service  
           └─856 /usr/sbin/mariabdd  
  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Note] Plugin 'FEEDBACK' is disabled.  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Note] InnoDB: Loading buffer pool(s) from  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Warning] You need to use --log-bin to mak  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Note] Server socket created on IP: '0.0.0  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Note] InnoDB: Buffer pool(s) load complet  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: 2024-06-13 13:01:34 0 [Note] /usr/sbin/mariabdd: ready for conne  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi mariabdd[856]: Version: '10.11.6-MariaDB-0+deb12u1' socket: '/run/mysqld/mysq  
Jun 13 13:01:34 raspberrypi systemd[1]: Started mariadb.service - MariaDB 10.11.6 database server.
```

Figura 27. Servicio MySQL activo

Se instaló phpMyAdmin que es una herramienta de software libre escrita en PHP que sirve para la administración de MySQL a través de la web.

```
sudo apt install php phpmyadmin -y  
sudo phpenmod mysql  
sudo service apache2 restart  
sudo ln -s /usr/share/phpmyadmin /var/www/html/phpmyadmin
```

Luego de ejecutar estos comandos de debe tener acceso a phpMyAdmin con la dirección <http://localhost/phpmyadmin>, esto devuelve un login para ingresar las credenciales el administrador tal y como se muestra en la Figura 28.

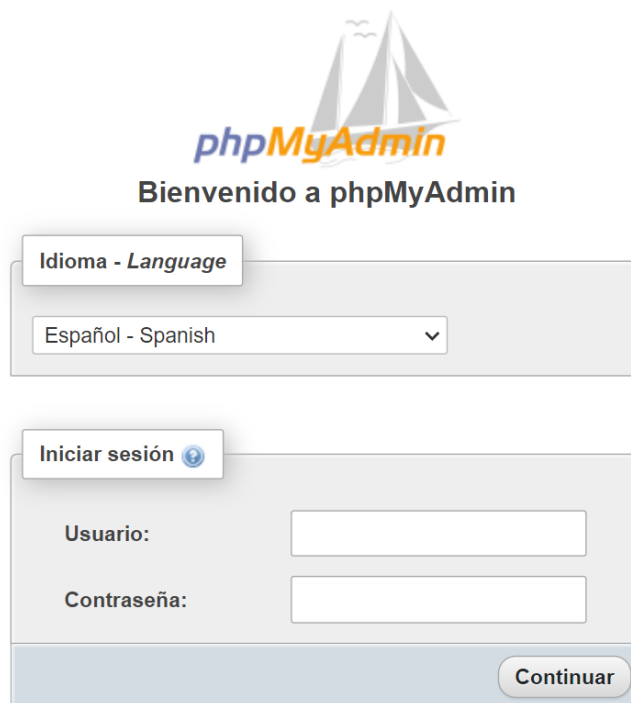


Figura 28. Ventana login de phpMyAdmin

b. Creación de la base de datos

Dentro de la interfaz de phpMyAdmin se creó la base de datos para el registro de la información obtenida por los sensores instalados en la estación de carga y de la placa controladora en el UAV. Dentro de la base de datos se creó tres tablas donde se reservan los datos del consumo general de la estación, consumo de transmisor e información proporcionada por el UAV. En la Figura 29 se presentan las tablas creadas en la base de datos.

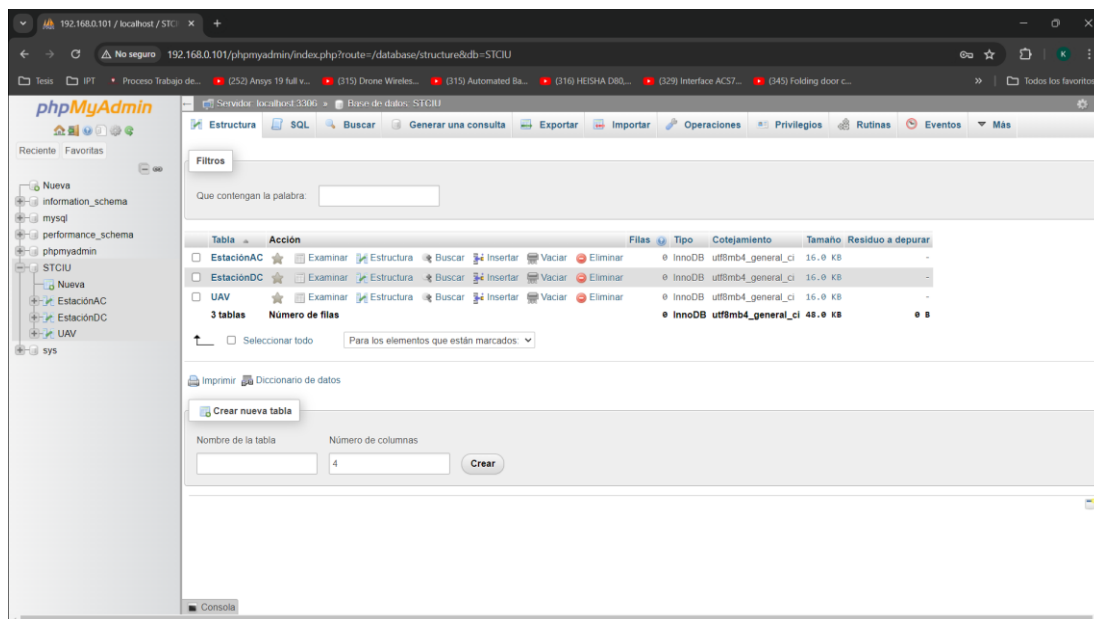


Figura 29. Configuración de la base de datos en MySQL

c. Instalación del bróker MQTT

El protocolo MQTT de comunicación requirió la instalación de un bróker, específicamente mosquitto que es una implementación del protocolo MQTT ligero y de código abierto. El puerto de escucha que se debe configurar en el broker mosquitto es el 1883. En sistemas Linux se instaló como un servicio con los siguientes comandos:

```
sudo apt install mosquitto
sudo apt install mosquitto-clients
sudo apt install nodejs
sudo systemctl start mosquitto.service
sudo systemctl enable mosquitto.service
sudo systemctl status mosquitto.service
```

Con el comando de verificación de estado del servicio se devuelve por consola los mensajes de la Figura 30.

```
ksand@raspberrypi: ~
ksand@raspberrypi:~$ sudo systemctl status mosquitto.service
● mosquitto.service - Mosquitto MQTT Broker
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Thu 2024-06-13 13:01:31 -05; 1h 41min ago
     Docs: man:mosquitto.conf(5)
           man:mosquitto(8)
   Process: 755 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
   Process: 758 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto /var/log/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
   Process: 759 ExecStartPre=/bin/mkdir -m 740 -p /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
   Process: 762 ExecStartPre=/bin/chown mosquitto /run/mosquitto (code=exited, status=0/SUCCESS)
  Main PID: 766 (mosquitto)
    Tasks: 1 (limit: 3910)
       CPU: 927ms
    CGroup: /system.slice/mosquitto.service
```

Figura 30. Servicio Mosquitto activo

d. Instalación de Grafana

La instalación de Grafana se realizó para la configuración del dashboard de visualización que permite el monitoreo y control de los datos proporcionados por la estación de carga y el UAV. Los comandos que se utilizaron son:

```
sudo mkdir -p /etc/apt/keyrings/  
wget -q -O - https://apt.grafana.com/gpg.key | gpg --dearmor | sudo tee /etc/apt/keyrings/grafana.gpg  
> /dev/null  
echo "deb [signed-by=/etc/apt/keyrings/grafana.gpg] https://apt.grafana.com stable main" | sudo tee  
/etc/apt/sources.list.d/grafana.list  
sudo apt-get install -y grafana  
sudo /bin/systemctl enable grafana-server  
sudo /bin/systemctl start grafana-server
```

Para acceder a Grafana se debe ingresar en el navegador la dirección <http://localhost:3000>, con la instalación correctamente realizada y el servicio activo se debe visualizar la ventana de login como en la Figura 31.

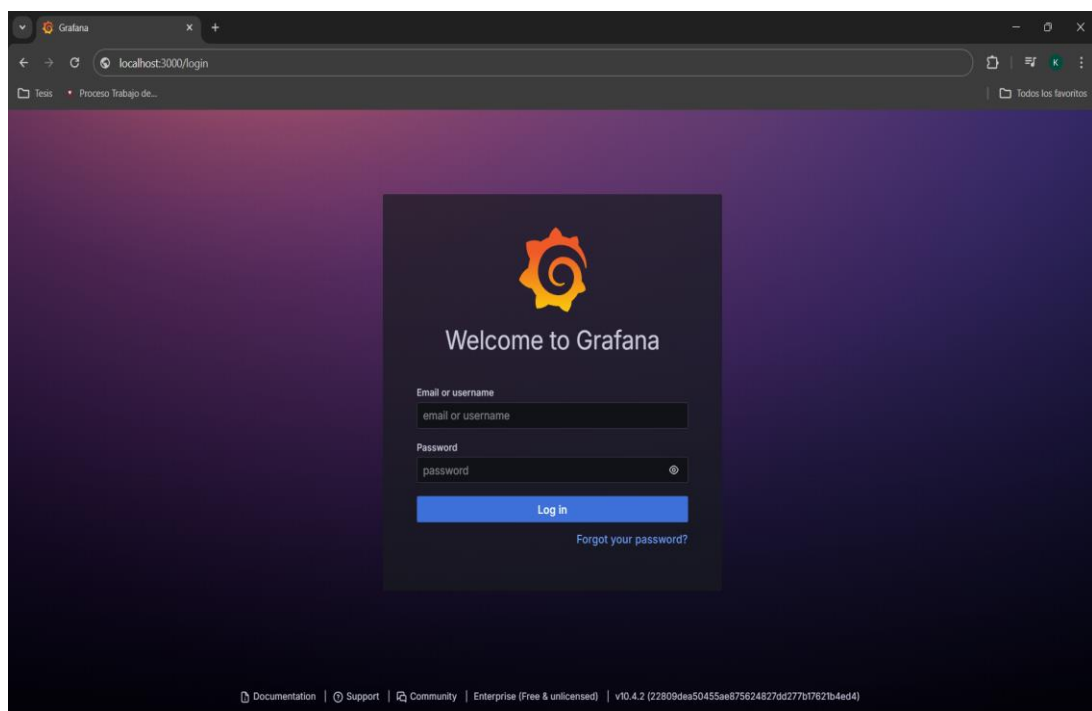


Figura 31. Login de Grafana

e. Esquema de conexión de los sensores en la estación de carga

Los sensores ACS712, AC SCT-013-015 y FZ0430 se conectaron a una placa de desarrollo con microcontrolador ESP32 para la sensorización de voltaje y corriente para la obtención del consumo en vatios generado por la estación de carga.

El sensor de corriente AC SCT-014-015 no invasivo se encarga de tomar datos de consumo directo del tomacorriente, para conectar este sensor a la placa ESP32 se utilizó un módulo ADS1115 que proporciona una mayor resolución de bits y permitió una mayor precisión en los datos.

Los sensores ACS712 (corriente DC) y FZ0430 (voltaje DC) se utilizan para obtener datos de la fuente de alimentación en DC para la circuitería interna de la estación, estos están conectados directamente a pines analógicos de la placa de desarrollo. El esquema de conexión se puede observar en la Figura 32.

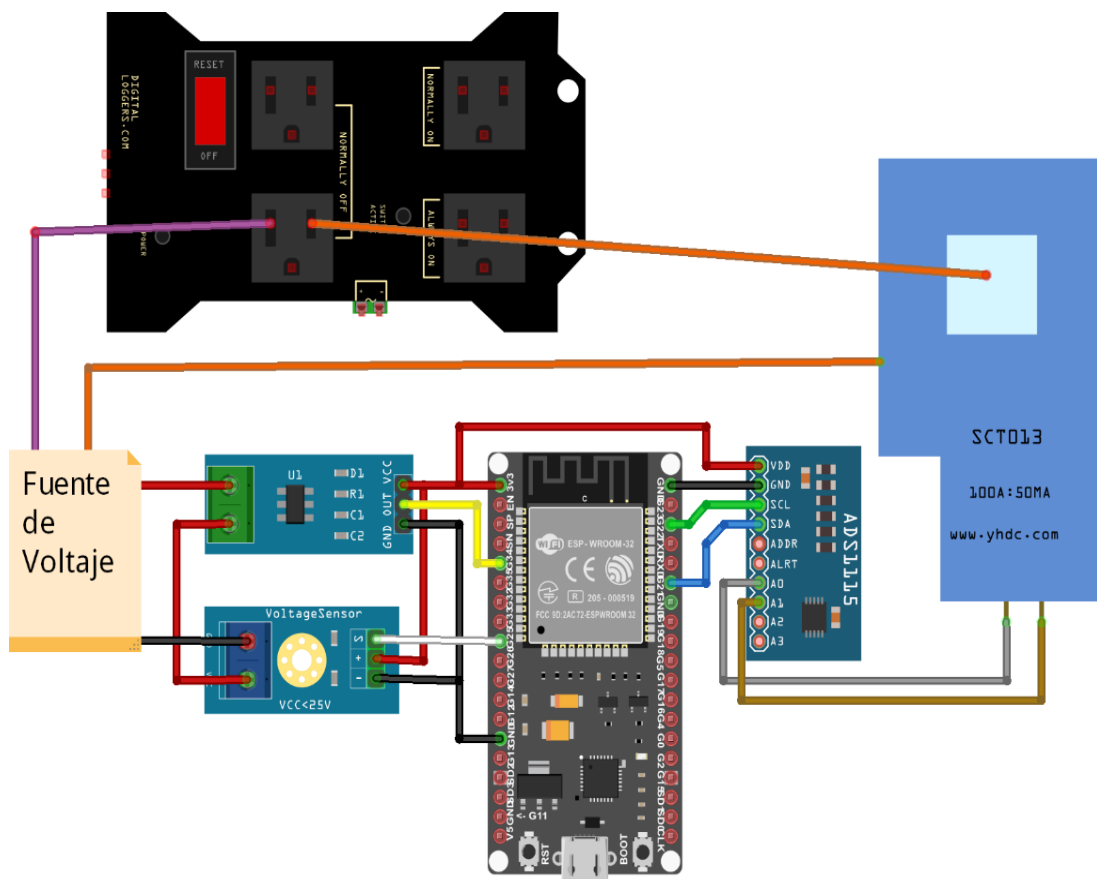


Figura 32. Esquema de conexión de sensores con ESP32

f. Programación de la ESP32 en la estación de carga

Para la publicación de los datos del consumo energético generado por la estación de carga se programó la tarjeta de desarrollo ESP32 con una conexión a una red de internet, con el objetivo de conectar con el servidor MQTT y la base de datos MySQL.

Esto se consiguió con la utilización de librerías existentes en el IDE de Arduino. Las librerías utilizadas son: Wi-Fi para la conexión a internet, PubSubClient para la publicación con MQTT, MySQL_Connection para publicación den la base de datos, Adafruit_ADS1X15 y Wire para el conexionado del sensor de corriente alterna.

Una vez establecida la conexión con el servidor MQTT, la placa se prepara para obtener los datos de los sensores y dar un formato para los mensajes que se publican en un tópico definido en el servidor MQTT, del mismo modo se realiza para la base de datos. El diagrama de flujo de programación descrito se visualizar en la Figura 33. El código de programación completo se detalla en el Anexo E.

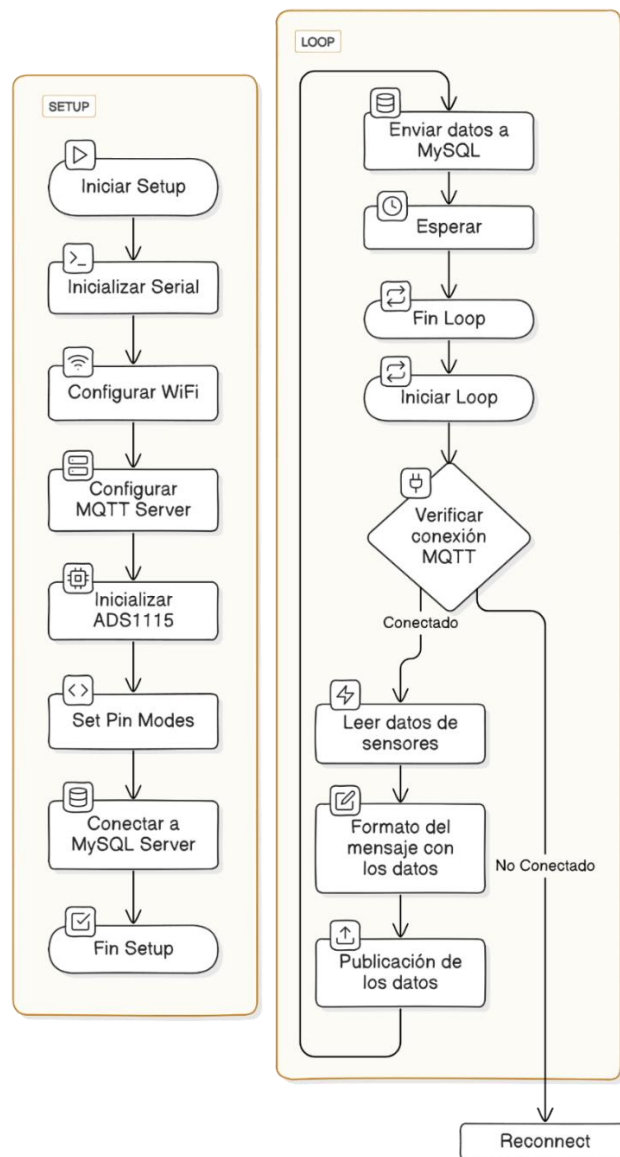


Figura 33. Diagrama de flujo de programación en la estación de carga

g. Programación para la adquisición y publicación de datos del UAV

El UAV proporciona los datos respecto de su funcionamiento tales como voltaje, corriente, velocidad, modo de vuelo, altitud, latitud y longitud, entre otros. Estos datos se pueden visualizar en una interfaz gráfica con ayuda de un bróker MQTT. El código de programación se desarrolló en el lenguaje de programación Python. En la Figura 34 se puede visualizar el diagrama de secuencia que describe el funcionamiento del programa. En el Anexo F se muestra el código de programación en Python, este código se ayuda para la publicación de datos en MySQL con los códigos que encuentran en el Anexo G y el Anexo H.

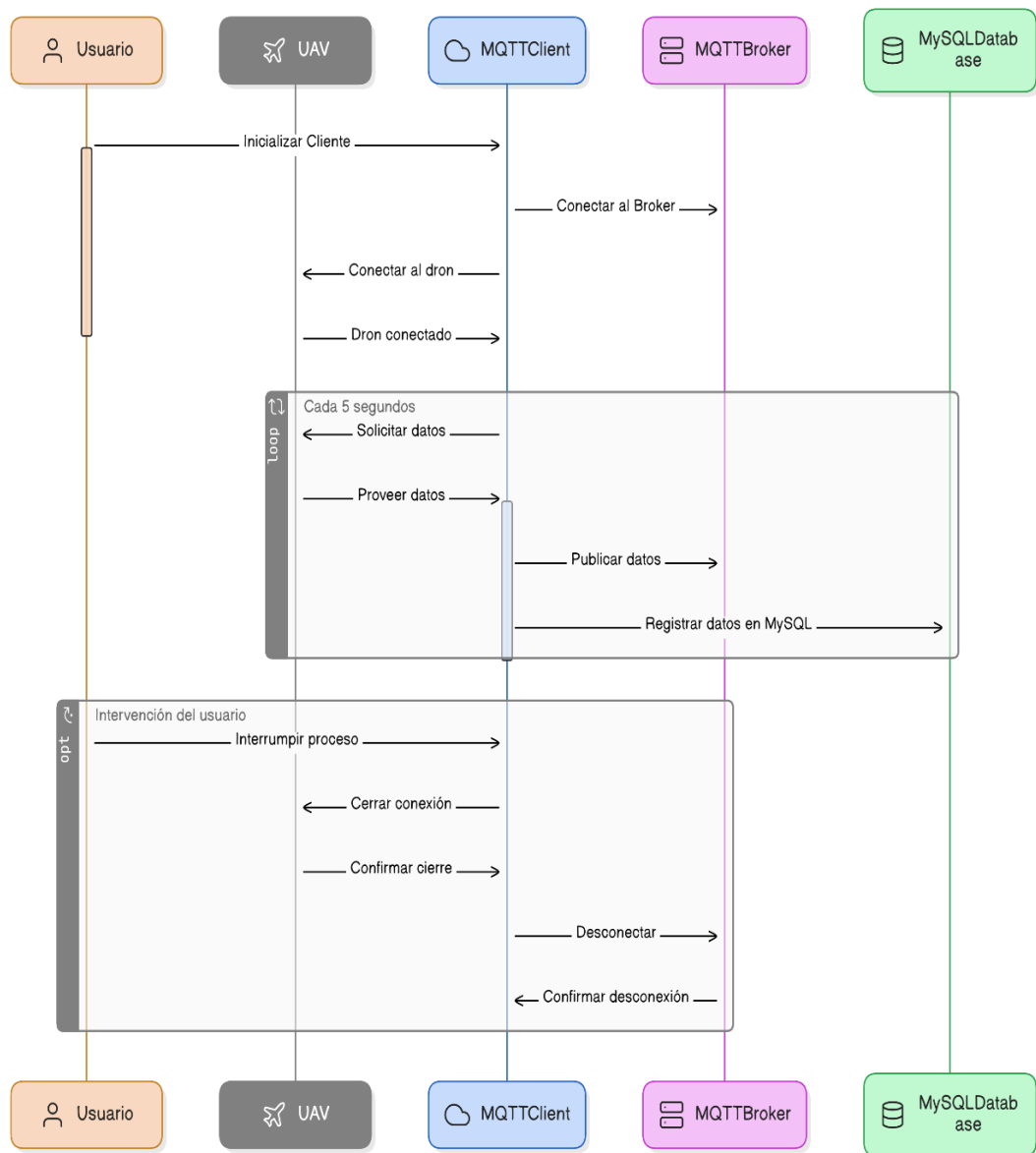


Figura 34. Diagrama de secuencia para la adquisición de datos del UAV

h. Configuración de los recursos de datos en Grafana

Con acceso al servicio Grafana se realizó la configuración del dashboard para la visualización de datos, para la presentación se asignó las fuentes de información que son la base de datos de MySQL y el protocolo MQTT. La configuración para el acceso a la base de datos de MySQL se presenta en la Figura 35.

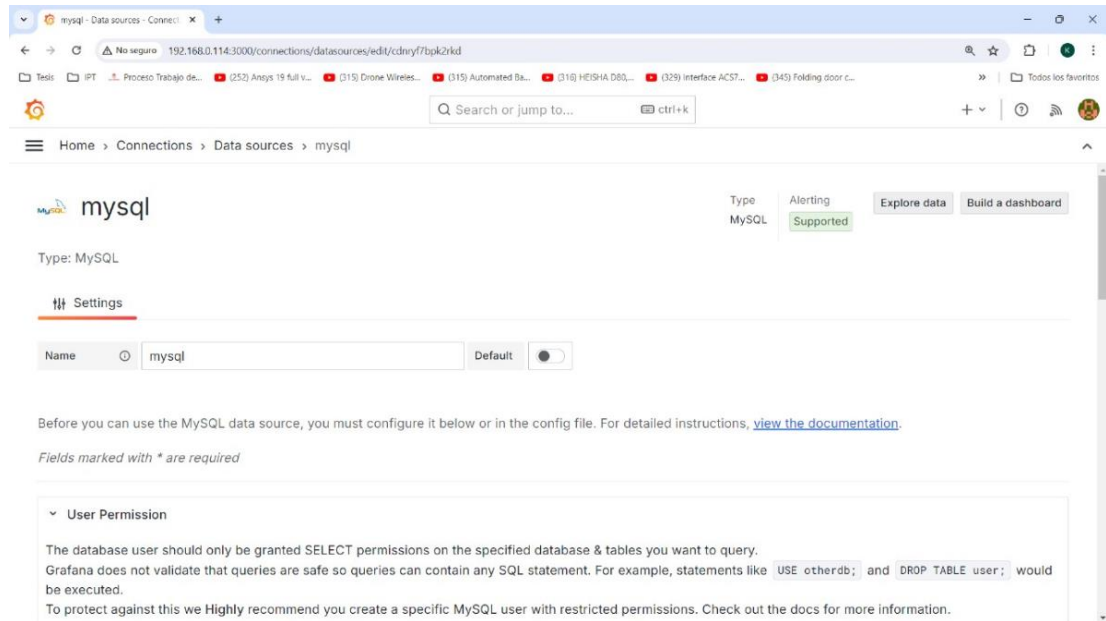


Figura 35. Configuración de MySQL en Grafana

Del mismo modo se realizó para el protocolo MQTT en la Figura 36.

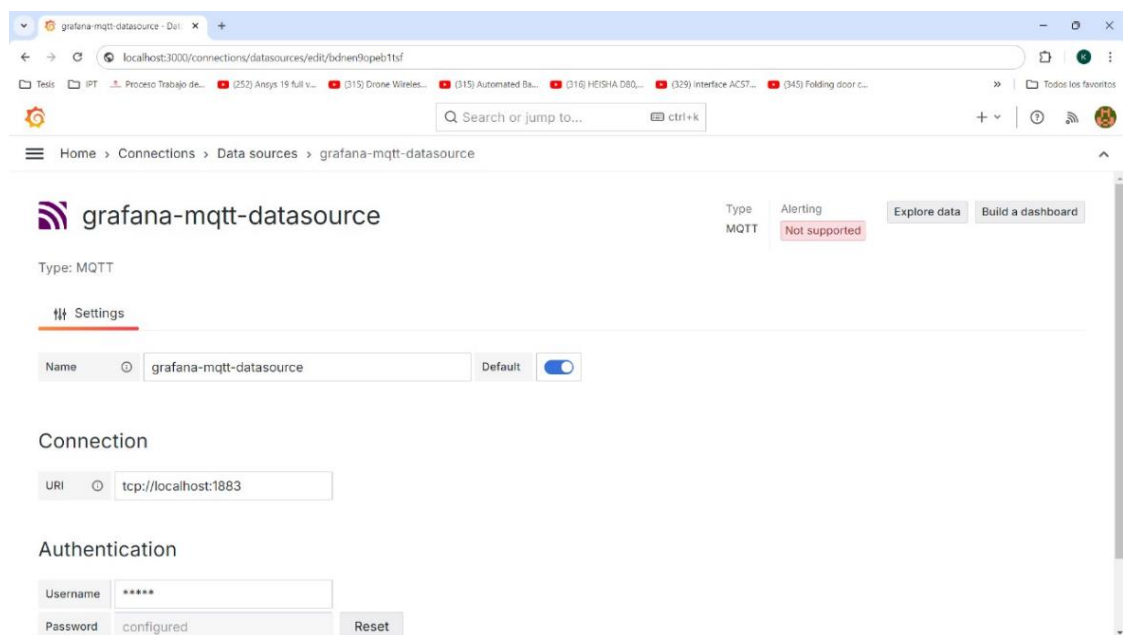


Figura 36. Configuración del protocolo MQTT en Grafana

i. Adquisición de datos en el dashboard

La integración de gráficas en el dashboard se realizó como se presenta en la Figura 37 con la asignación del gráfico específico a mostrar y seleccionando el recurso de datos específico, en este caso el protocolo MQTT con su respectivo tópicos y el tiempo de actualización y presentación de los datos.

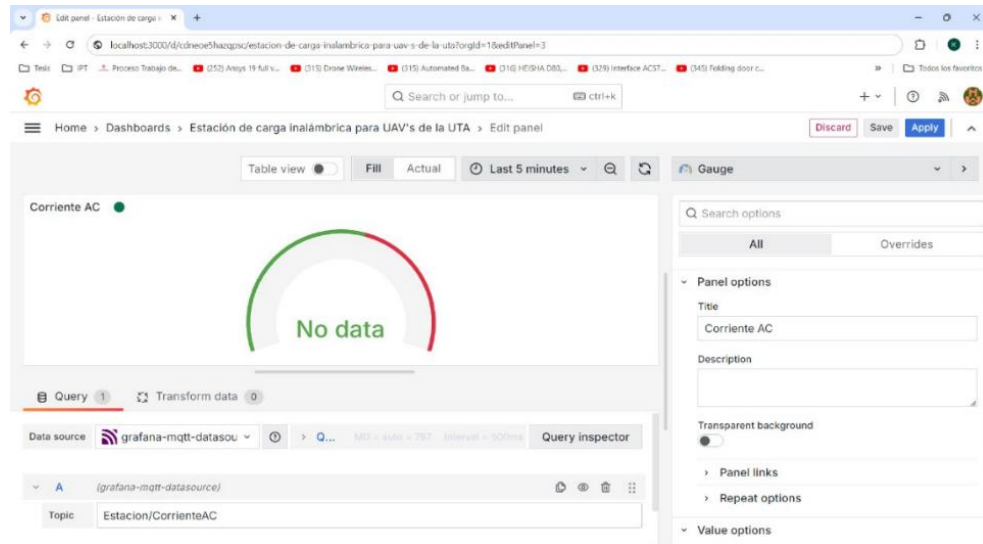


Figura 37. Configuración para la presentación de datos en el dashboard

j. Interfaz de visualización final

En la Figura 38 los datos obtenidos de la estación de carga y del UAV se muestran en el dashboard de visualización en Grafana para la presentación de la información.

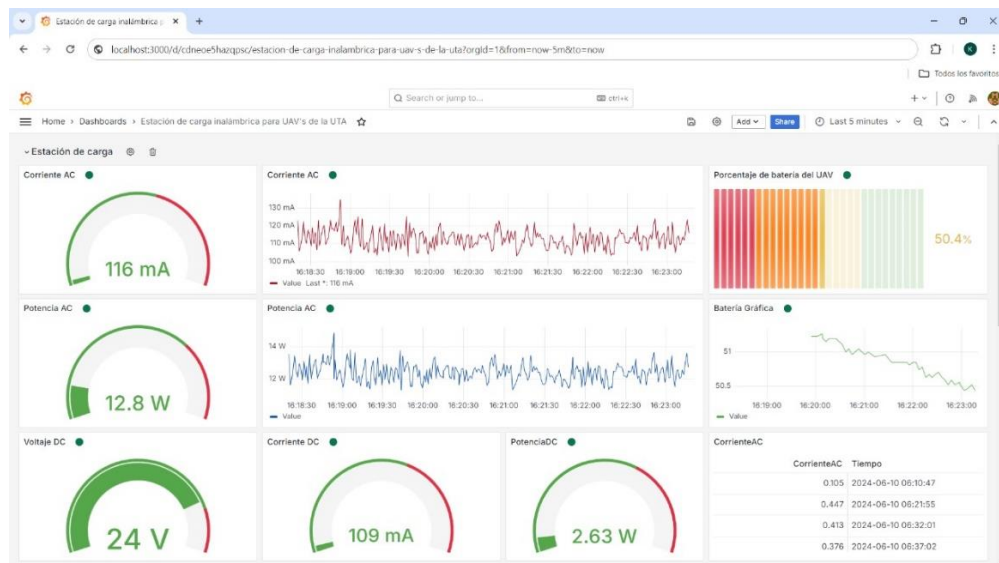


Figura 38. Interfaz de visualización final

3.1.10 Diseño de la estructura para la estación de carga

a. Diseño

Para la estructura de la estación de carga inalámbrica se definió la forma de un prisma rectangular. Con el software Fusion360 inicialmente se desarrolló el boceto de cada una de las caras del prisma con muescas que facilitan su acoplamiento, este boceto se puede observar en la Figura 39.

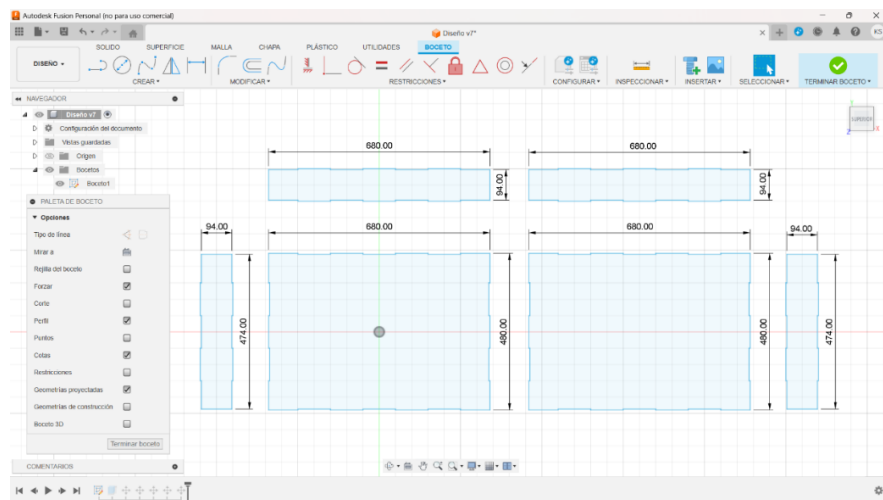


Figura 39. Boceto de la estructura de la estación de carga

Luego, con ayuda del boceto inicial se utilizó la herramienta extruir que permite generar una visualización 3D de cada una de las caras del prisma, la Figura 40 muestra cada una de las piezas extruidas.

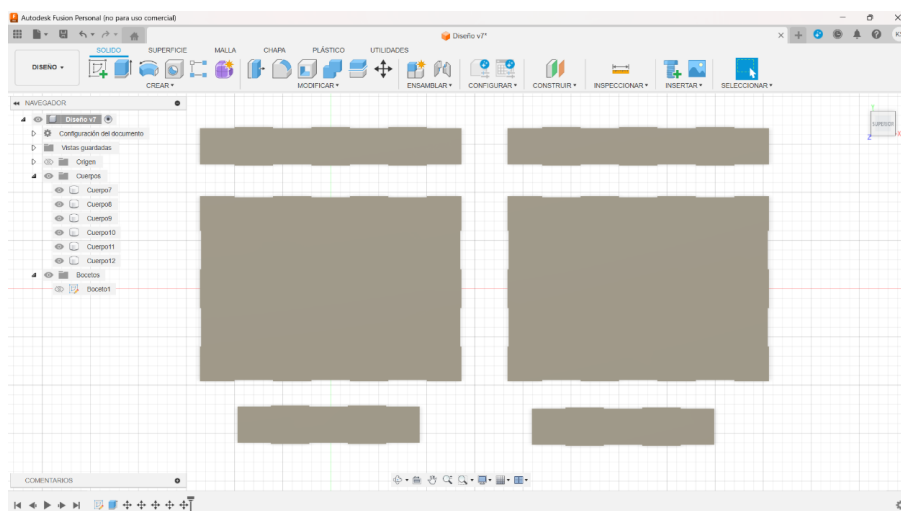


Figura 40. Caras del prisma en 3D para la estación de carga

Finalmente, con ayuda de la herramienta de ensamble del programa Fusion 360 se unió cada una de las caras del prisma rectangular generando una visualización simulada de la estructura final en la Figura 41.

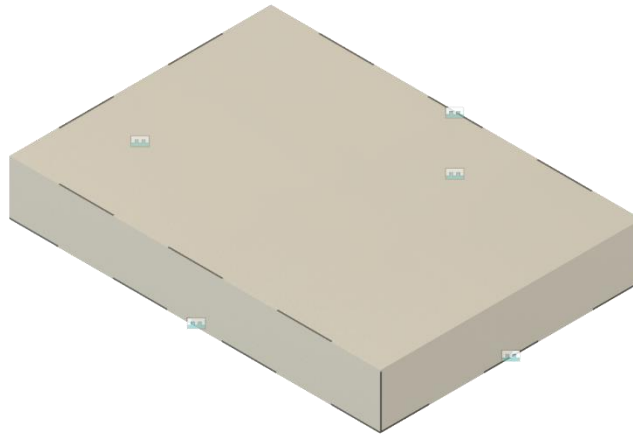


Figura 41. Simulación en 3D de la estructura de la estación de carga

b. Selección del material

Entre los materiales para la estructura de la estación de carga inalámbrica se consideró la madera MDF, láminas de Aluminio y PLA (Ácido Poli láctico). Las propiedades o características que son importantes para la selección del material son el costo, conductividad térmica, resistencia al calor, facilidad de manejo, durabilidad, impacto ambiental, entre otros. En la Tabla 27 se tiene una comparativa de los materiales en función de las propiedades mencionadas anteriormente.

Tabla 27. Tabla comparativa de los materiales para la construcción de la estación

Propiedad / Material	MDF (3 mm de espesor)	Láminas de Aluminio	PLA (Ácido Poli láctico)
Costo	Bajo (\$15 por plancha de 1.20 x 2.40)	Medio a Alto (\$35 por plancha de 1.20 x 2.40 m)	Alto (En función del tamaño de la estación)
Conductividad Térmica	Baja	Alta (puede calentarse)	Baja
Resistencia al calor	Moderada	Alta	Baja (se deforma a aprox. 60 °C)
Facilidad de manejo	Muy fácil de cortar y manipular	Requiere herramientas específicas para cortar y dar forma	Fácil de imprimir en 3D, pero costoso para grandes dimensiones.
Durabilidad	Moderada	Alta	Moderada
Impacto Ambiental	Moderada	Baja	Bajo
Aislamiento Eléctrico	Bueno	Pobre	Bueno
Peso	Muy ligero	Ligero	Ligero

El MDF de 3 mm es la opción más adecuada para la construcción de la estación de transferencia de energía inalámbrica (WPT) debido a su notable costo-efectividad, especialmente en comparación con el aluminio y el PLA para las dimensiones requeridas por cada cara del prisma rectangular. Este material no solo ofrece beneficios económicos significativos, sino también proporciona ventajas en términos de propiedades térmicas y eléctricas; su baja conductividad térmica minimiza los riesgos de sobrecalentamiento, crucial para mantener la eficiencia y seguridad del sistema.

Además, el MDF de 3 mm es muy ligero y fácil de manipular, facilitando el montaje y ajuste de la estructura, lo que lo convierte en una solución práctica y eficiente para este proyecto, equilibrando adecuadamente la durabilidad, el manejo y los costos.

c. Construcción

En el proceso de construcción inicialmente se realizó el corte láser de las piezas que conforman el prisma rectangular, para ello se realizó el diseño mostrado anteriormente en el programa Fusion 360, el archivo se exporta y al cargarlo en la máquina de corte láser se encarga de realizar los cortes con precisión.

Como resultado del corte se obtuvo 6 piezas de MDF con muescas a distancia de 10 centímetros. Estas piezas se pueden observar en la Figura 42 y la Figura 43.



Figura 42. Pieza superior de la estación de carga



Figura 43. Piezas laterales de la estación de carga

Las piezas se ensamblaron con ayuda de muescas realizadas a corte laser de las piezas de la estación y pegamento de cola. En la Figura 44 se muestra el proceso de ensamblaje de las piezas del prisma rectangular que forma la estación.

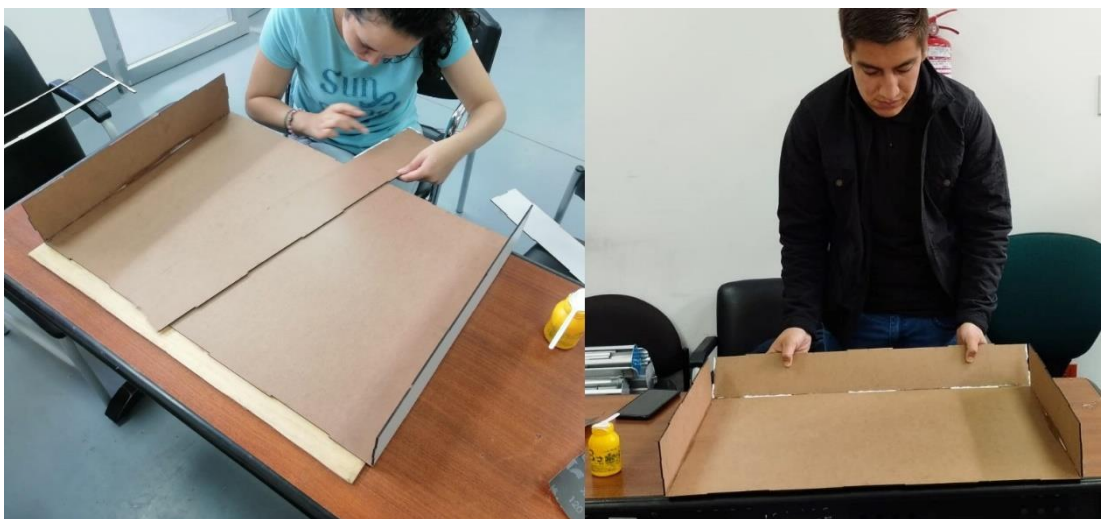


Figura 44. Ensamblaje de las piezas de la estación

Luego de haber ensamblado todas las piezas se tiene el producto final en la Figura 45.

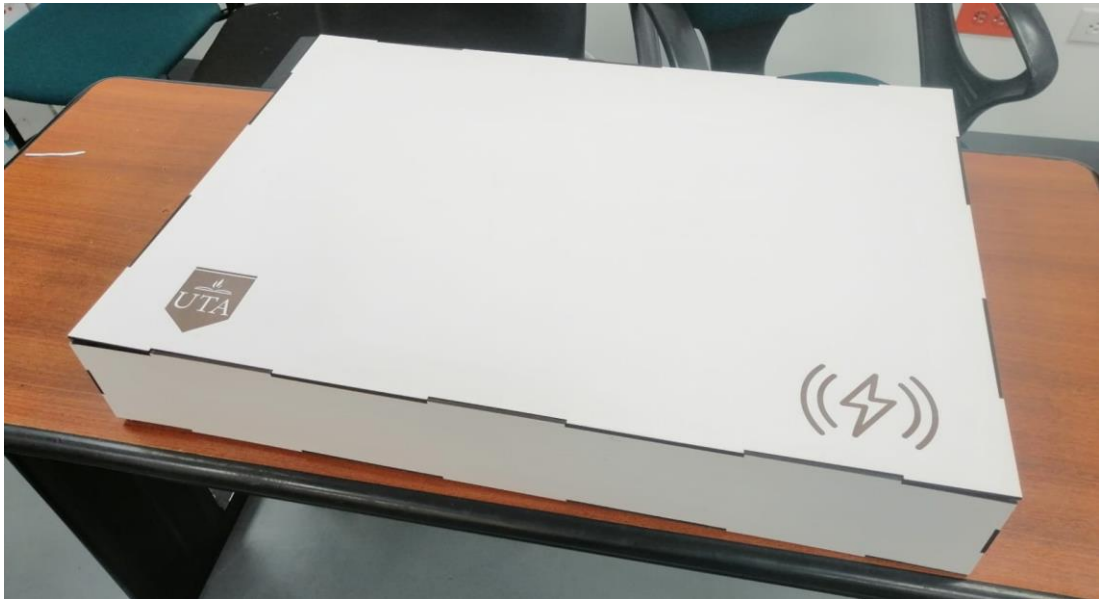


Figura 45. Estructura de la estación de carga

Con esto se tiene la estación final con un largo de 680 mm de largo x 480 mm de ancho y 10 mm de alto. La pieza superior es extraíble para la instalación y mantenimiento de la circuitería interna.

3.2 Montaje del sistema telemetrizado de carga inalámbrica

El sistema telemetrizado de carga inalámbrica requirió la instalación del circuito transmisor con su arquitectura IoT para la telemetría de las variables físicas que intervienen en el proceso de carga. En el receptor se realizó la conexión de un circuito de conmutación para el modo de vuelo y el modo de carga, los datos del UAV se registran en el servidor con ayuda del módulo de telemetría 3DR.

3.2.1 Montaje de la estación de carga con telemetría

Sobre la estructura de la estación de carga se realizó la instalación de la Raspberry pi que contiene al servidor con el módulo de tierra para la telemetría del UAV, el módulo XKT-801 para la transferencia de energía por inducción que se conectó a los sensores SCT-013, ACS712 y FZ0430 que en conjunto con la tarjeta de adquisición de datos ESP32 y el convertidor analógico-digital ADS1115 formaron la arquitectura IoT que

permite la adquisición de datos. En la Figura 46 se presenta la conexión del servidor, transmisor y la arquitectura IoT en la estructura de la estación de carga.

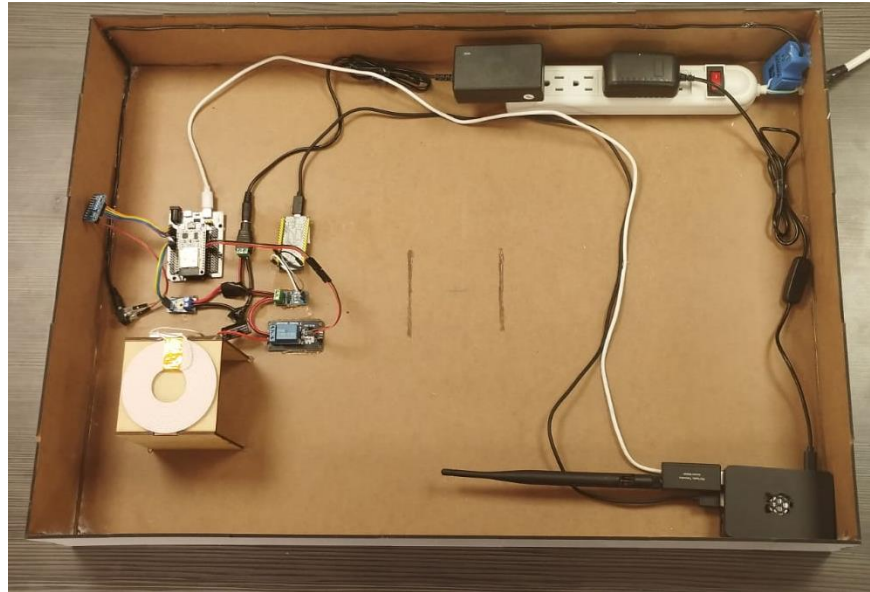


Figura 46. Instalación de los elementos de la estación de carga

El sistema se instaló con una conexión a la red eléctrica a través de un cortapicos, este a su vez entrega energía a dos fuentes de alimentación que proporcionan corriente directa al módulo transmisor inductivo XKT-801 y a la Raspberry Pi (Servidor). El transmisor utiliza una fuente DC de 24 voltios y 2 amperios, por otra parte, el servidor se alimenta con una fuente de 5 voltios y 3 amperios. Con el servidor se energiza el módulo de telemetría en tierra para la adquisición de datos del UAV y la arquitectura IoT con los puertos USB. El módulo relé se utiliza para reducir el consumo cuando el UAV no necesita carga.

3.2.2 Montaje del circuito de conmutación y telemetría en el UAV

Para el circuito de conmutación en el receptor se utilizó un microcontrolador, un módulo relé de dos canales y dos sensores de voltaje FZ0430. El módulo relé permite cambiar entre el modo de carga y el modo de vuelo, uno de los canales conecta el receptor inductivo XKT-3170 en conjunto con el cargador balanceador a la batería LiPo, por otra parte, el segundo canal conecta la batería LiPo con la tarjeta controladora de vuelo. En la Figura 47 se puede visualizar el esquema de conexión del receptor.

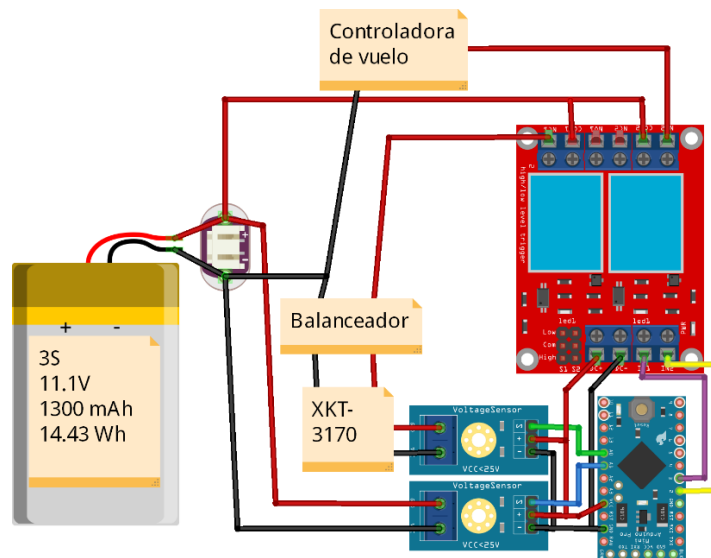


Figura 47. Esquema de conexión del circuito de conmutación

Con el objetivo de reducir la cantidad de cableado que se utiliza en el conmutador se desarrolló una placa PCB con ayuda del software de simulación Proteus para la conexión e integración de la placa Arduino nano, los sensores y el módulo relé de dos vías. En la Figura 48 se muestra el circuito de conmutación en placa PCB. En el Anexo I, se presenta la simulación en Proteus del circuito conmutador.

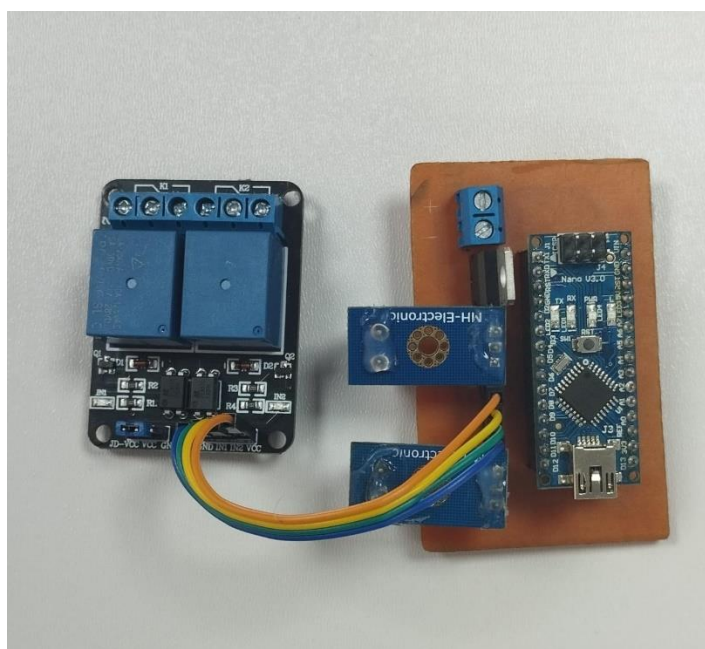


Figura 48. Circuito de conmutación en placa PCB

En la Figura 49 se presenta el diagrama de secuencia de programación del circuito de conmutación. El código completo se registró en el Anexo J.



Figura 49. Diagrama de secuencia de programación en el circuito de conmutación

El circuito de conmutación se activa en función del nivel de voltaje de la batería LiPo y el nivel de voltaje que se recepta en el módulo inductivo XKT-3170. Si el voltaje de la batería LiPo es inferior a 12.4 voltios y en la salida del circuito receptor se detectan más de 6 voltios entonces el relé activa el modo de carga conectando el balanceador a la batería, si no se cumple alguna de esas dos condiciones entonces el circuito de conmutación se mantiene en modo de vuelo. Para el montaje del circuito receptor se diseñó una estructura en el programa Fusion 360 para su posterior impresión en 3D. En la Figura 50 se puede visualizar el diseño de la estructura.



Figura 50. Diseño de la estructura para el receptor

Se utilizó el material PLA (ácido poli-láctico) para la impresión en 3D de la estructura del receptor, de tal manera que sea ligera y fácil de montar en el UAV como se muestra en la Figura 51. En el Anexo K se presentan pruebas de vuelo con el receptor instalado en el UAV.



Figura 51. Receptor con su estructura instalada en el UAV

En la Figura 52 se muestra la conexión del módulo de comunicación RF 3DR de aire para telemetría conectado a la placa controladora de vuelo MatekF405-STD, en conjunto con el módulo de tierra permiten una conexión serial al servidor.

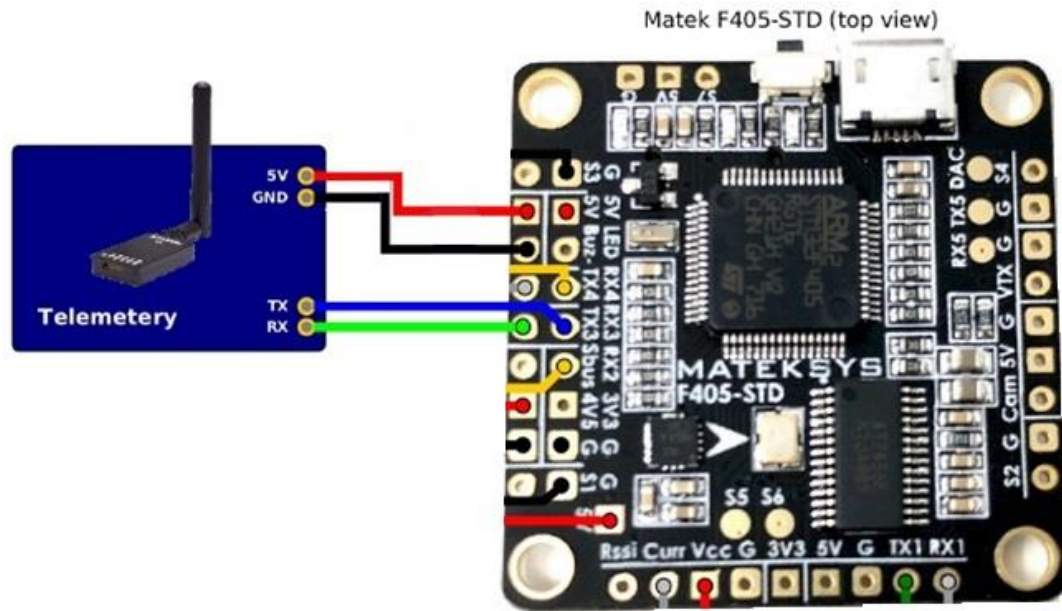


Figura 52. Conexión del módulo de telemetría a la controladora de vuelo

3.2.3 Automatización del sistema

El estacionamiento del UAV, ya sea controlado manualmente o mediante vuelos automáticos programados con el software Mission Planner, puede no garantizar la transferencia de energía al llegar a la estación de carga debido a posibles desalineamientos. Si la distancia entre el transmisor y el receptor es mayor a 3 cm, la eficiencia de captación de energía por parte de la bobina receptora se verá reducida.

Para mitigar este problema de manera automatizada y sin intervención humana, se ha desarrollado un sistema equipado con motores a pasos. Este sistema corrige la posición del UAV en la estación de carga inalámbrica, moviéndolo precisamente hacia el punto de resonancia entre las bobinas transmisora y receptora, asegurando así una transferencia óptima de energía.

Se utilizó motores a pasos NEMA17 conectados al módulo A4988 para controlar a través de programación en Arduino el sentido de giro de motor y la cantidad de pasos

a dar para ubicar al UAV en la zona de mayor transferencia de potencia. En la Figura 53 se muestra el esquema de conexión de los motores.

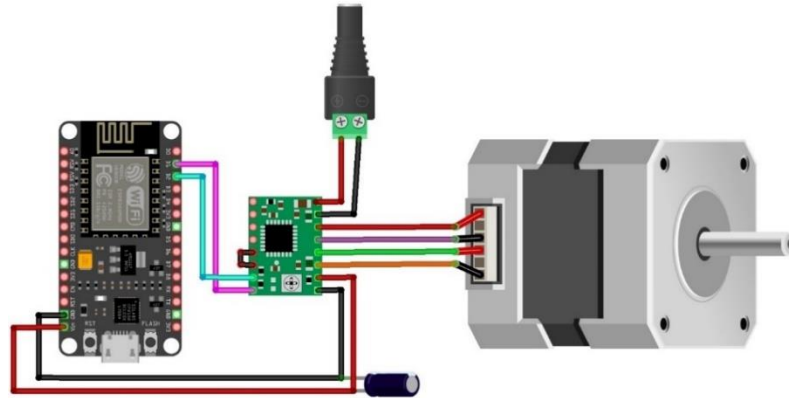


Figura 53. Conexión del motor NEMA17 y el módulo A4988

En el sistema también se implementó un sensor ultrasónico HC-SR04 y el sensor infrarrojo HW-201. Para ello se programaron los motores y los sensores de acuerdo con el diagrama de la Figura 54.

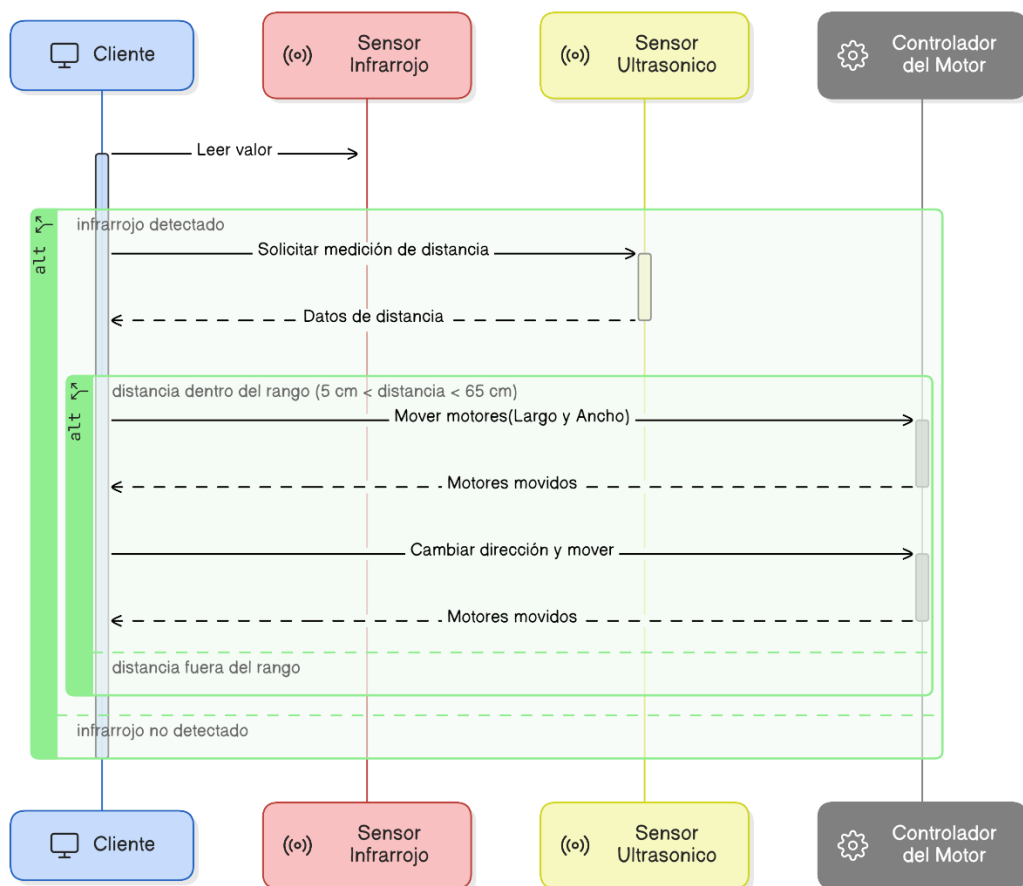


Figura 54. Diagrama de secuencia del sistema automatizado

La estación de carga inalámbrica para UAV con el sistema de ubicación del UAV en la zona de máxima transferencia de potencia se puede visualizar en la Figura 55.



Figura 55. Sistema de carga automatizado

3.2.4 Sistema inteligente de carga inalámbrica

La integración de la automatización en el sistema de carga inalámbrica permitió incorporar un sensor ultrasónico para detectar la presencia del UAV y un sensor infrarrojo para verificar que el vehículo esté correctamente alineado en el punto de máxima transferencia de potencia. Los sensores de voltaje, corriente, ultrasónico e infrarrojo ubicados en la estación de carga inalámbrica, junto con los módulos de telemetría instalados en el UAV y un programa en Python que se ejecuta en el servidor para la adquisición de datos del vehículo, han creado una plataforma inteligente para la carga de baterías de polímero de litio.

Los módulos de telemetría proporcionan datos sobre el porcentaje y los niveles de voltaje de la batería que alimenta al UAV. Utilizando el protocolo MQTT y el servicio Mosquitto instalado en un servidor desarrollado en una Raspberry Pi, se establece una comunicación en tiempo real entre el UAV y la estación de carga. Esto permite que, al verificar el porcentaje de la batería del vehículo y su detección en la estación, se active el transmisor según la necesidad de carga. Este sistema ajusta el tiempo de carga en función del porcentaje de batería con el que el UAV llega a la estación.

En conjunto el sistema de comunicación, la red de sensores, la estación de carga y el UAV forman el sistema inteligente que permite la transferencia de energía de manera eficiente e inteligente permitiendo un mantenimiento predictivo. En la Figura 56 se presenta el sistema de carga con tecnología inteligente.

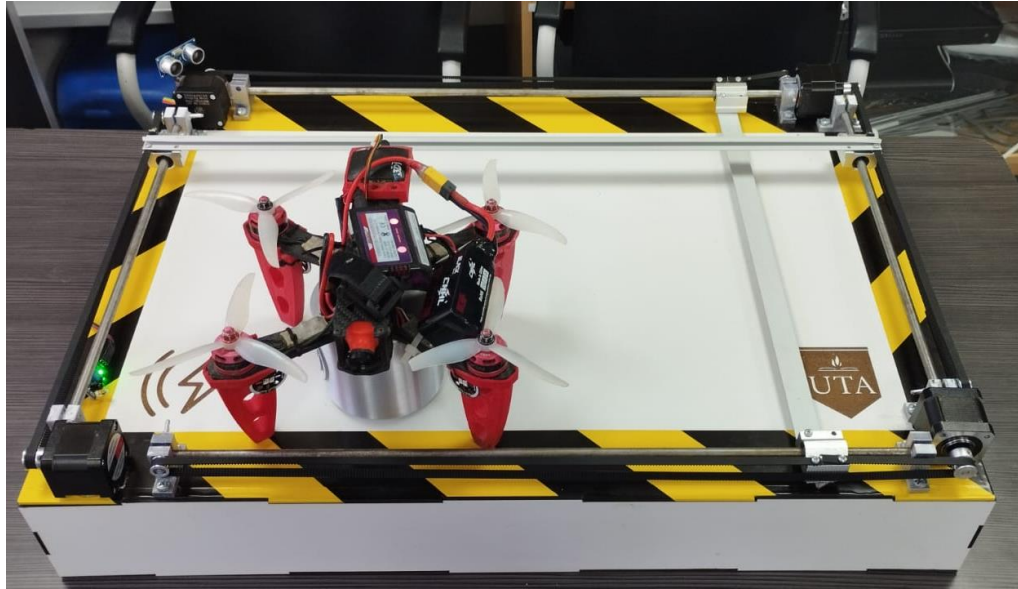


Figura 56. Sistema inteligente de carga inalámbrica

3.3 Resultados

3.3.1 Experimentación con bobinas

En este estudio, se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales utilizando bobinas fabricadas con cable de cobre esmaltado de calibres 15 y 18. También se puso a prueba el cable Litz de calibre 15. El objetivo principal de estas pruebas fue evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones de bobinas con distintas separaciones entre los módulos. La construcción de las bobinas se evidencia en el Anexo L.

Para el sistema de transferencia de energía por inducción se realizó la conexión de las bobinas al transmisor XKT-801 y al receptor XKT-3170 en combinaciones con inductores de cable de cobre y cable Litz para determinar la configuración que ofrece mejores resultados en términos de eficiencia del sistema y distancia operativa. Esta experimentación se llevó a cabo en tres diferentes escenarios. Las distintas pruebas de funcionamiento se evidencian en el Anexo M.

a. Sin carga

En este escenario, las bobinas estaban dispuestas sin ninguna conexión externa, lo que permitió medir el comportamiento básico y las propiedades inherentes de las bobinas en un entorno aislado. El registro de las mediciones realizadas se muestra de la Tabla 28 a la Tabla 31.

Tabla 28. Cobre - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.40 V
2.5 cm	24 V	12.38 V
3.5 cm	24 V	12.38 V
4.5 cm	24 V	9.3 V
5.5 cm	24 V	7.7 V
6.5 cm	24 V	5.3 V
7.5 cm	24 V	4 V

Tabla 29. Cobre - Cobre AWG 18

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.39 V
2.5 cm	24 V	12.38 V
3.5 cm	24 V	9.9 V
4.5 cm	24 V	6.2 V
5.5 cm	24 V	3.7 V

Tabla 30. Litz - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.40 V
2.5 cm	24 V	12.39 V
3.5 cm	24 V	12.38V
4.5 cm	24 V	9.1 V
5.5 cm	24 V	7.7 V
6.5 cm	24 V	5.6 V
7.5 cm	24 V	3.9 V

Tabla 31. Litz - Litz AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.40 V
2.5 cm	24 V	12.39 V
3.5 cm	24 V	12.38V
4.5 cm	24 V	9.7 V
5.5 cm	24 V	9.08 V
6.5 cm	24 V	6.5 V
7.5 cm	24 V	4.6 V

b. Con carga – Conexión directa al cargador

En las mediciones tomadas de la Tabla 32 a la Tabla 35, las bobinas se conectaron directamente a un cargador, permitiendo evaluar su desempeño bajo condiciones de carga real, sin intermediarios.

Tabla 32. Cobre - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.38 V
2.5 cm	24 V	12.38 V
3.5 cm	24 V	12.38 V
4.5 cm	24 V	9.8 V
5.5 cm	24 V	6.7 V
6.5 cm	24 V	4.6 V
7.5 cm	24 V	3.3 V

Tabla 33. Cobre - Cobre AWG 18

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.38 V
2.5 cm	24 V	12.38 V
3.5 cm	24 V	8 V
4.5 cm	24 V	5.6 V
5.5 cm	24 V	3.9 V

Tabla 34. Litz - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.39 V
2.5 cm	24 V	12.39 V
3.5 cm	24 V	12.38 V
4.5 cm	24 V	10.6 V
5.5 cm	24 V	7.1 V
6.5 cm	24 V	5 V
7.5 cm	24 V	3.7 V

Tabla 35. Litz - Litz AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.40 V
2.5 cm	24 V	12.38 V
3.5 cm	24 V	12.38 V
4.5 cm	24 V	12.20 V
5.5 cm	24 V	8 V
6.5 cm	24 V	5.5 V
7.5 cm	24 V	4.3 V

c. Con carga – Conexión al cargador y a la Batería LiPo

En esta configuración, las bobinas se conectaron tanto a un cargador balanceador como a una batería de polímero de litio (LiPo). Los resultados se muestran de la Tabla 36 a la Tabla 39.

Tabla 36. Cobre - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.37 V
2.5 cm	24 V	12.37 V
3.5 cm	24 V	10.8 V
4.5 cm	24 V	7.2 V
5.5 cm	24 V	6.5 V
6.5 cm	24 V	4.8 V
7.5 cm	24 V	3.8 V

Tabla 37. Cobre - Cobre AWG 18

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.37 V
2.5 cm	24 V	9.1 V
3.5 cm	24 V	8 V
4.5 cm	24 V	5.2 V
5.5 cm	24 V	3.1 V

Tabla 38. Litz - Cobre AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.38 V
2.5 cm	24 V	12.37 V
3.5 cm	24 V	12.37 V
4.5 cm	24 V	7.3 V
5.5 cm	24 V	6.9 V
6.5 cm	24 V	4.9 V
7.5 cm	24 V	3.4 V

Tabla 39. Litz - Litz AWG 15

Separación	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
1.5 cm	24 V	12.38 V
2.5 cm	24 V	12.37 V
3.5 cm	24 V	12.38 V
4.5 cm	24 V	9.9 V
5.5 cm	24 V	8 V
6.5 cm	24 V	5.5 V
7.5 cm	24 V	4.3 V

Como resultado de la experimentación con bobinas se determinó que el mejor material para la construcción de los inductores y su conexión con el transmisor y receptor es el cable Litz, con este material se alcanzó una distancia máxima de separación de hasta 4.5 cm permitiendo generar 12.20 voltios efectivos para la carga de la batería LiPo instalada en el UAV.

En los sistemas de transferencia de energía por inducción, los principales fenómenos físicos que generan pérdidas son el efecto skin y el efecto de proximidad, estos se producen a la circular corriente alterna a través de un conductor. Estos efectos se maximizan cuando la corriente circula a frecuencias altas. Las pérdidas generadas por estos efectos se pueden reducir con la implementación del cable Litz ya que posee características físicas y eléctricas que permiten mejorar el factor de calidad de los inductores reduciendo los efectos de la resistencia de corriente alterna AC en el inductor.

3.3.2 Medición en el osciloscopio

Con las bobinas de cable Litz construidas se procedió a verificar el funcionamiento del sistema con ayuda de un osciloscopio y un multímetro para la obtención de las señales que intervienen en la transferencia de energía. Para ello se colocó en el canal uno del osciloscopio la señal que genera el transmisor, mientras que en el canal dos se obtuvo la señal de energía captada por el módulo receptor. En la Figura 57 se puede visualizar la señal generada por el módulo transmisor.

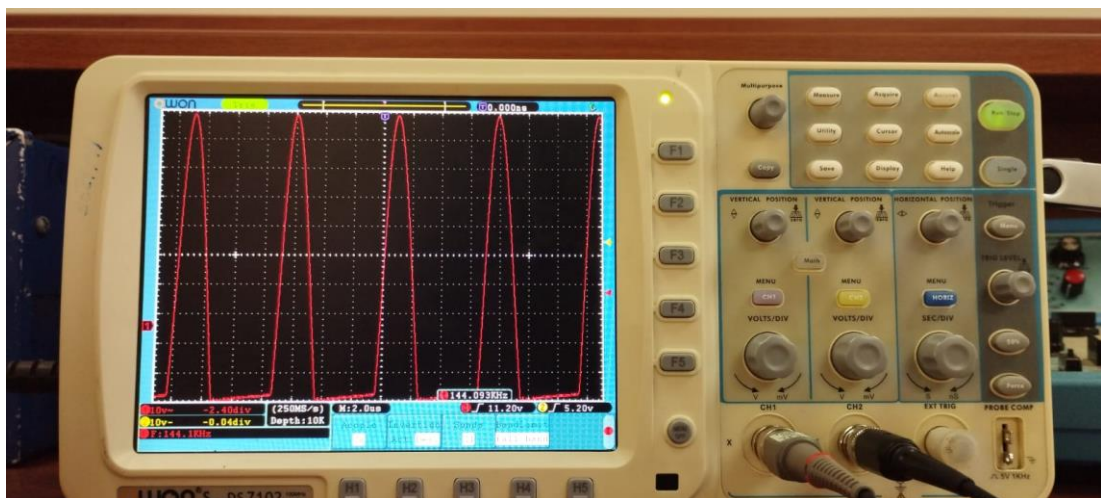


Figura 57. Señal en el módulo transmisor XKT-801

El receptor se ubicó a una distancia de 2.5 cm de distancia para una mayor transferencia de energía. En la Figura 58 se muestra la señal obtenida en la bobina receptora.

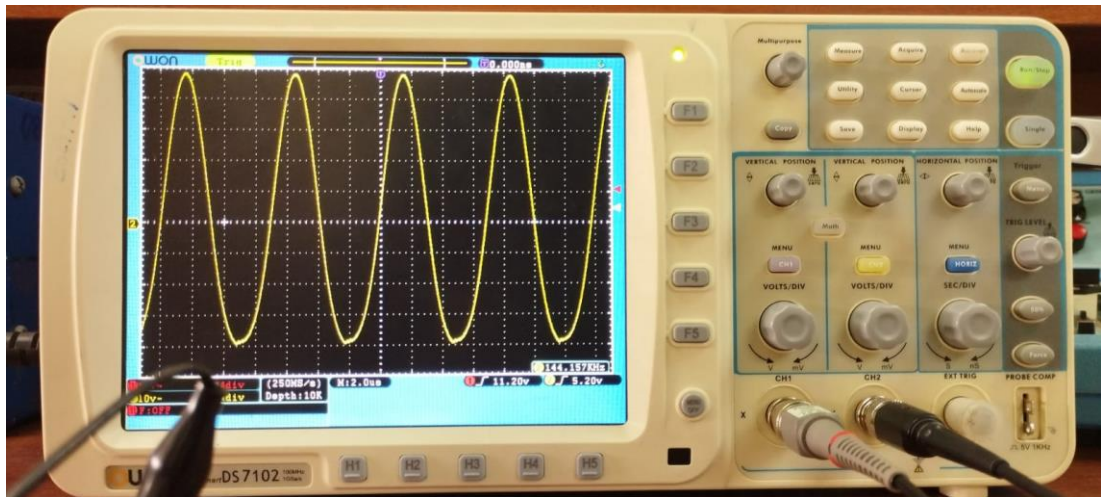


Figura 58. Señal de la energía captada en el módulo receptor XKT-3170

El sistema cumple con el estándar de carga inalámbrica Qi, en las señales se puede observar que el transmisor y el receptor operan a una frecuencia de resonancia de 144 KHz. La captura de las señales obtenidas en el sistema se aplicó conectando el transmisor a una fuente de alimentación de 24 voltios a 2 amperios y el receptor al balanceador de carga conectada a la batería del UAV como se muestra en la Figura 59.

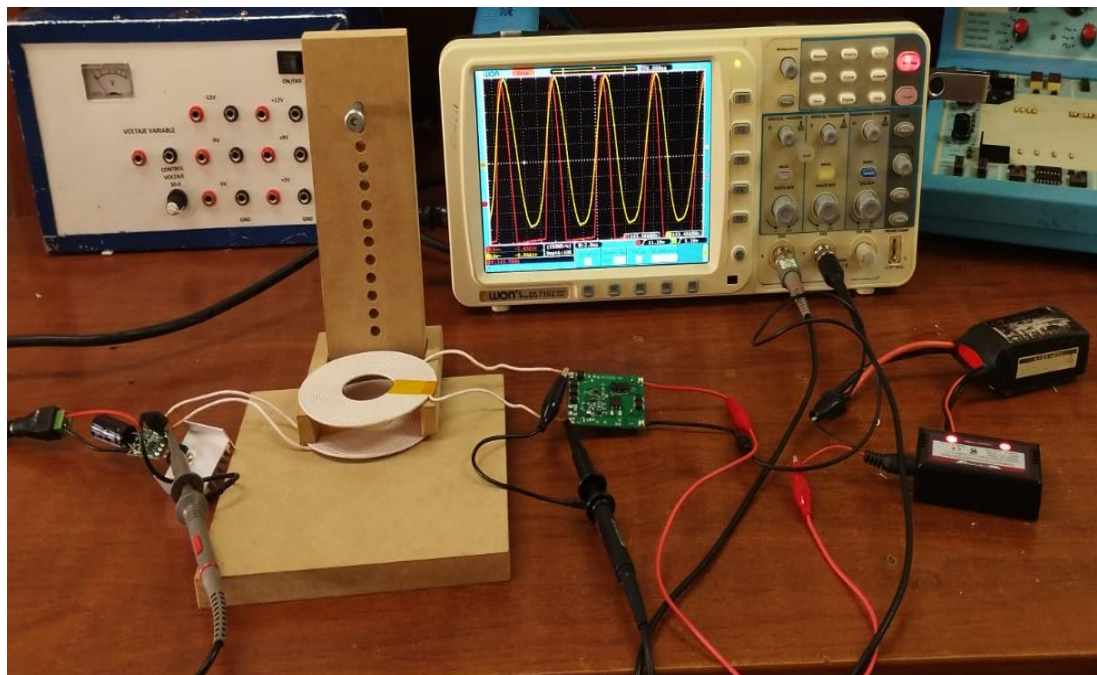


Figura 59. Medición en el sistema IPT con osciloscopio

Con el sistema funcionando y conectado al osciloscopio se obtuvieron los datos de cada una de las señales con ayuda del osciloscopio. Los datos obtenidos de la señal del transmisor se muestran en la Tabla 40. La adquisición de datos se presenta en el Anexo N.

Tabla 40. Datos de la señal del transmisor

Parámetro	Valor
Periodo	6.940 us
Promedio	1.826 V
Vrms	35.57 V
Vmin	-27.20 V
Vbase	-23.60 V
OverShoot	0.8%
Rise Time	960.0 ns
+D width	1.840 us
+Duty	26.4%
Frecuencia	144.1 KHz
Voltaje pico-pico	99.20 V
Voltaje máximo	72.00 V
Vtop	71.20 V
Vamp	94.80 V
PreShoot	3.8 %
Fall Time	1.0 us
-D width	5.120 us
-Duty	74.6%

Los datos obtenidos de la señal en el receptor para el análisis y comparación con la señal transmitida se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Datos de la señal del receptor

Parámetro	Valor
Periodo	6.970 us
Promedio	254.1 mV
Vrms	30.11 V
Vmin	-34.80 V
Vbase	-31.60 V
OverShoot	1.5%
Rise Time	1.680 us
+D width	2.840 us
+Duty	40.6%
Frecuencia	143.5 KHz
Voltaje pico-pico	83.20 V
Voltaje máximo	48.20 V
Vtop	47.20 V
Vamp	78.80 V
PreShoot	4.1 %
Fall Time	1.480 us
-D width	4.160 us
-Duty	59.4%

La frecuencia de oscilación de la señal de energía generada por el transmisor se mantiene casi constante con un valor que oscila entre 143.5 y 144 KHz en el receptor, esto demuestra una alta eficiencia en el sistema de transferencia de energía por inducción. Por otra parte, los valores de voltaje pico-pico, voltaje RMS, voltaje máximo y voltaje top son menores en el receptor, el transmisor genera un voltaje RMS de 35.57 voltios y en la recepción se tiene 30.11 voltios para su posterior conversión en corriente directa, esto representa las pérdidas que se generan en el sistema durante el proceso de transferencia de energía, estas pérdidas se generan debido a la distancia existente entre el transmisor y receptor.

3.3.3 Tolerancia a desalineamientos

Un factor importante para tener en cuenta en los sistemas de transferencia de energía de forma inalámbrica por inducción es el desalineamiento que se puede presentar entre el transmisor y receptor. Este desalineamiento genera disminución en la eficiencia de la transferencia de energía, con una alineación perfecta se maximiza el acoplamiento magnético.

El desalineamiento también puede generar variaciones en la impedancia del circuito lo que afecta la resonancia, desgaste prematuro de los componentes que conforman el circuito del sistema e incluso daño de estos, interferencia y ruido con pérdida de energía en forma de calor. En la Tabla 42 se muestran los valores de voltaje obtenidos con pequeños desalineamientos a una distancia de 2.5 cm.

Tabla 42. Funcionamiento del sistema de carga con desalineamiento

Desalineamiento	Voltaje de entrada	Voltaje de salida
0.5 cm	24 V	12.40 V
1 cm	24 V	12.35 V
1.5 cm	24 V	12.35 V
2 cm	24 V	12.28 V
2.5 cm	24 V	12.25 V
3 cm	24 V	12.18 V
3.5 cm	24 V	12 V
4 cm	24 V	11.2 V
4.5 cm	24 V	10.9 V
5 cm	24 V	8 V

Como resultado de las pruebas de funcionamiento del sistema de carga aplicando desalineamiento entre el transmisor y receptor dio como resultado que la transferencia de potencia es efectiva para cargar la batería con un desalineamiento máximo aceptable de 3.5 cm lo que genera 12 voltios para la carga de la batería de LiPo.

El sistema tiene una tolerancia a errores, minimizando el requerimiento de ajustes constantes para la carga inalámbrica, proporcionando versatilidad y flexibilidad en el desalineamiento para su aplicación en el UAV debido a la falta de precisión de su módulo GPS.

3.3.4 Campo magnético y distancia de transferencia de potencia

El factor de acoplamiento entre el inductor conectado al transmisor y el inductor en el receptor es muy importante para un correcto funcionamiento del sistema y una mayor eficiencia en la transferencia de energía. El campo magnético generado por el módulo transmisor se determinó con el número de vueltas de la bobina, la longitud del conductor y la magnitud de corriente que circula a través del cable. La Ecuación (18) permite calcular el campo magnético

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (18)$$

Reemplazando valores:

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})(15)(2 \text{ A})}{2.78 \text{ m}}$$

$$B = 13.561 \times 10^{-6} \text{ Teslas}$$

$$B = 13.561 \mu T$$

El valor del campo magnético generado por el transmisor resulto de $13.561 \mu T$, este campo magnético a una frecuencia de 144 KHz, con este valor se puede comprobar que la distancia máxima que se puede alcanzar sin pérdidas es de 4.5 cm, para ello se utiliza la Ecuación (19) que muestra el campo magnético en el eje de un bucle circular.

$$B = \frac{\mu_0 NR^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (19)$$

Reemplazando valores en la ecuación se despeja el valor de z para determinar la distancia máxima de transferencia de energía.

$$13.561 \times 10^{-6} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(2)(0.04)^2}{(2)((0.04)^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$(0.0016 + z^2)^{3/2} = \frac{(8\pi \times 10^{-7})(0.0016)}{27.122 \times 10^{-6}}$$

$$(0.0016 + z^2)^{3/2} = 0.001488$$

$$z^2 \approx 0.00194$$

$$z \approx 0.045 \text{ m} \approx 4.5 \text{ cm}$$

Dando como resultado que la transferencia máxima de potencia se alcanza matemáticamente en valores mínimos calculados de 0.5 cm y máximo de 4.5 cm de distancia entre el transmisor y receptor.

3.3.5 Coeficiente de acoplamiento

El coeficiente de acoplamiento se determinó con ayuda un proceso experimental, con los resultados obtenidos de la medición de las señales en el osciloscopio, considerando el valor de voltaje RMS que se genera en el transmisor de 35.57 voltios y el voltaje RMS inducido en el receptor de 30.11 voltios se puede aplicar la Ecuación (20) para determinar el coeficiente de acoplamiento del sistema.

$$k = \frac{V_2}{V_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (20)$$

Se realizó la medición de inductancia en las bobinas de transmisión y recepción, dando como resultado $14.2 \mu H$ y $13.7 \mu H$ respectivamente. Reemplazando estos valores en la Ecuación (20) se tiene:

$$k = \frac{30.11}{35.57} \sqrt{\frac{14.2 \times 10^{-6}}{13.7 \times 10^{-6}}}$$

$$k = 0.8618$$

El cálculo con medición experimental del coeficiente de acoplamiento en el sistema de transferencia de potencia por inducción dio como resultado un valor de 0.8618. Este coeficiente puede variar entre 0 y 1, donde 0 indica una ausencia total de acoplamiento y 1 representa un acoplamiento perfecto.

Un valor de 0.8618 es bastante alto, lo que refleja una eficiencia significativa en la transferencia de energía. Este resultado sugiere que el sistema es eficaz en la transferencia de potencia cuando la bobina transmisora y la receptora se sitúan a una distancia de 3.5 cm. Las pérdidas se mantienen bajas, por lo tanto, la transmisión de energía es estable y confiable.

3.3.6 Pérdidas del sistema

Las pérdidas en el sistema se dan principalmente por dos efectos particulares, el efecto skin o piel y el efecto de proximidad. Estos efectos no generan pérdidas significativas debido al uso de cable Litz y materiales no conductores en la estación.

d. Efecto Skin o piel

Los materiales usados para el desarrollo de las bobinas para el sistema fueron cobre esmaltado con AWG 15 y cable Litz de 120 hilos y AWG 32 de cada hilo. Con estos datos se procedió con el cálculo de este efecto para cada cable con la siguiente ecuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (20)$$

Donde:

ρ es la resistividad del material (cobre $\rho = 1.68 \times 10^{-8}$)

μ es la permeabilidad del material (cobre $\mu_0\mu_r = 4\pi \times 10^{-7}$)

ω frecuencia angular, $\omega = 2\pi f = 2\pi(144 \times 10^3) = 903.779 \times 10^3 \text{ rad/s}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2(1.68 \times 10^{-8})}{(4\pi \times 10^{-7})(903.779 \times 10^3 \text{ rad/s})}}$$

$$\delta = 0.179 \times 10^{-3}m = 0.179 \text{ mm}$$

Para el caso del cobre esmaltado con un diámetro de hilo de 1.45 mm y el radio del hilo es de 0.725, dado que la profundidad tiene un valor de 0.179 mm y la frecuencia utilizada es de 144 KHz la corriente alterna tiende a concentrarse cerca de la superficie del hilo lo que deja el interior del conductor con poca corriente, aumentando la resistencia efectiva del conductor para AC debido al efecto skin.

Para el cable dado que está diseñado específicamente con hilos aislados eléctricamente y trenzados en busca de que la corriente fluya de manera uniforme en cada hilo, reduciendo resistencia efectiva, esto disminuye el efecto skin. Como el diámetro de cada hilo en el cable Litz es de 0.202 mm con radio de 0.101 y la profundidad de penetración de 0.172, la corriente alterna puede penetrar más allá de la superficie del hilo y se distribuye de mejor forma a través de toda la sección transversal del hilo.

e. Efecto de proximidad

Para el caso del efecto de proximidad no se tienen pérdidas ya que el material de construcción de la estructura no es ningún tipo de material conductor, por lo tanto, la transferencia de potencia no se ve afectada por este efecto.

3.3.7 Telemetría

Los datos obtenidos por la arquitectura IoT de la estación de carga inalámbrica se almacenan en una base de datos de MySQL y se publican con el protocolo MQTT en el dashboard configurado en Grafana.

Para la base de datos de MySQL la placa ESP32 se programó para obtener el promedio de los datos de corriente y potencia de AC en un periodo de 5 minutos, una vez realizado el promedio se publican los datos. Estos datos sirven para determinar el consumo general del sistema telemetrizado de carga inalámbrica.

Para el consumo del sistema de transferencia inductivo que funciona con corriente continua se programó para obtener el promedio de los datos del sensor de corriente ACS712 en el periodo de 1 minuto. En la Figura 60 se presentan los datos obtenidos del consumo general de la estación.

The screenshot shows the phpMyAdmin interface with the 'EstaciónAC' table selected. The table contains 16 rows of data, each representing a time-based measurement of current and power consumption.

ID	Tiempo	CorrienteAC	PotenciaAC
1	2024-06-10 11:10:47	0.1052	11.5743
2	2024-06-10 11:21:55	0.4471	49.1788
3	2024-06-10 11:32:01	0.4129	45.4197
4	2024-06-10 11:37:02	0.3762	41.384
5	2024-06-10 11:47:02	0.3774	41.5094
6	2024-06-10 11:52:02	0.3763	41.3908
7	2024-06-10 11:57:02	0.3745	41.1948
8	2024-06-10 12:02:07	0.3771	41.4765
9	2024-06-10 12:07:07	0.3763	41.39
10	2024-06-10 12:17:09	0.3787	41.6588
11	2024-06-10 12:22:07	0.3753	41.2816
12	2024-06-10 12:27:09	0.3753	41.2802
13	2024-06-10 12:32:09	0.3726	40.9914
14	2024-06-10 12:37:09	0.3734	41.0723
15	2024-06-10 12:42:13	0.3758	41.3416
16	2024-06-10 12:47:11	0.4042	44.4617

Figura 60. Tabla de datos del consumo general de la estación

En la Figura 61 se presenta el consumo generado por el transmisor.

The screenshot shows the phpMyAdmin interface with the 'EstaciónDC' table selected. The table contains 16 rows of data, each representing a time-based measurement of current and power consumption for the transmitter.

ID	Tiempo	CorrienteDC	PotenciaDC
1	2024-06-10 11:06:50	0.101	2.428
2	2024-06-10 11:07:48	0.12	2.869
3	2024-06-10 11:08:49	0.125	2.995
4	2024-06-10 11:10:49	0.121	2.916
5	2024-06-10 11:11:51	0.13	3.124
6	2024-06-10 11:12:51	0.137	3.29
7	2024-06-10 11:14:05	0.286	6.874
8	2024-06-10 11:19:17	0.269	6.467
9	2024-06-10 11:23:03	0.285	6.837
10	2024-06-10 11:24:27	0.288	6.917
11	2024-06-10 11:25:12	0.292	7.009
12	2024-06-10 11:27:14	0.304	7.305
13	2024-06-10 11:28:36	0.291	6.989
14	2024-06-10 11:30:56	0.278	6.683
15	2024-06-10 11:32:01	0.276	6.616
16	2024-06-10 11:33:02	0.272	6.526

Figura 61. Tabla de datos del consumo generado por transmisor

Para la publicación de datos en Grafana se utilizó el protocolo de comunicación MQTT que permite la presentación de los datos en tiempo real, con un tiempo máximo de publicación que esta entre 100 milisegundos y 1 segundo. En este caso no se realiza ninguna operación adicional con los datos. En la Figura 62 se presentan los datos de la estación de carga en tiempo real.

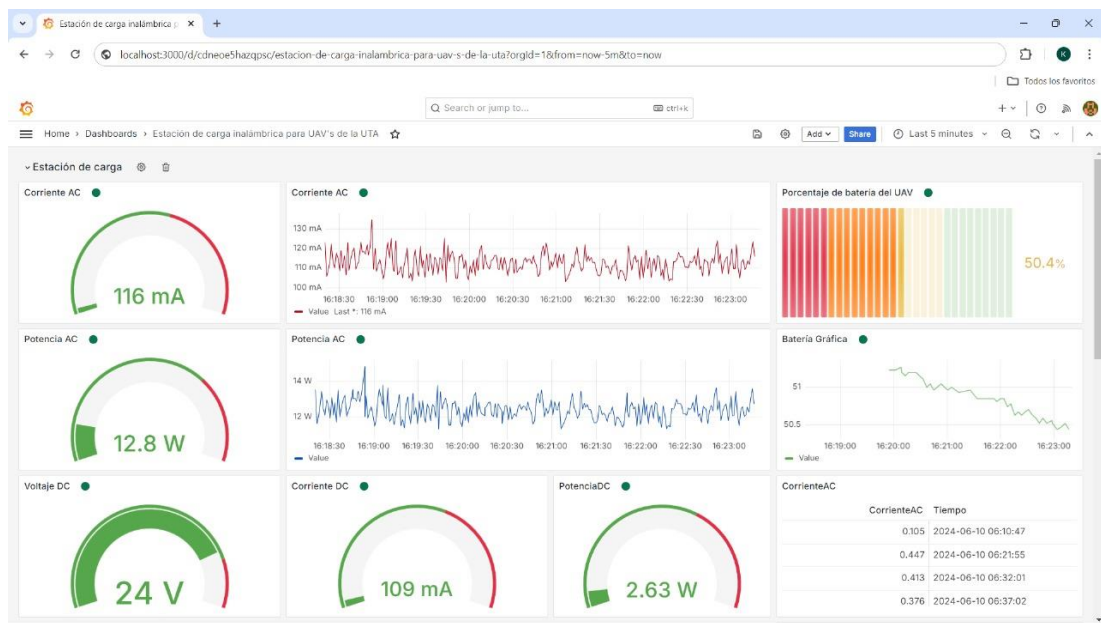


Figura 62. Dashboard de visualización de datos con telemetría

3.3.8 Consumo de la estación de carga

Con los valores de corriente y potencia en corriente alterna de la estación de carga registrada en la base de datos se puede determinar el consumo general de la estación durante el proceso de carga del UAV. En la Tabla 43 se muestran los datos de corriente y potencia que consume la estación en un proceso de carga completa de la batería del UAV.

Tabla 43 Datos de consumo de la estación

Corriente AC	Potencia AC
0.4471	49.1788
0.4129	45.4197
0.3762	41.3840
0.3774	41.5094
0.3763	41.3908
0.3745	41.1948
0.3771	41.4765
0.3763	41.3900
0.3787	41.6588
0.3753	41.2816
0.3753	41.2802
0.3726	40.9914
0.3734	41.0723
0.3758	41.3416
0.4042	44.4617

En la Figura 63 se puede observar y analizar la evolución de la corriente y la potencia a lo largo del tiempo mediante gráficas. La señal en color rojo representa la corriente medida por el sensor SCT-013, el cual captura datos precisos sobre el flujo de corriente en la estación. Estos datos de corriente son esenciales para calcular la potencia consumida por la estación en vatios, reflejada en la gráfica de color azul.

La similitud entre ambas señales es notable, ya que la potencia se obtiene multiplicando el voltaje constante suministrado por el tomacorriente (fijo en 110 voltios) por la corriente medida en cada instante. Este método proporciona una representación clara de cómo varía la potencia en función de las fluctuaciones en la corriente eléctrica a lo largo del tiempo.



Figura 63. Gráfica de corriente y potencia de consumo en Grafana

Obteniendo el promedio de los datos se tiene que el consumo en vatios de la estación en la carga es de 42.33544 W.

De acuerdo con la empresa eléctrica de Ambato el costo del kilovatio-hora es de 10 centavos de dólar. Para el análisis del consumo de la estación se considera el tiempo de carga del UAV que es de 1 hora y 30 minutos para alcanzar una carga completa, la potencia de consumo y el costo de la energía. El consumo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{consumo de energía}(kWh) = \frac{\text{Potencia}(W) * \text{tiempo de carga (horas)}}{1000} \quad (20)$$

Reemplazando los valores conocidos en la Ecuación (20).

$$\text{consumo de energía}(kWh) = \frac{(42.33544 W) * (1.5 \text{ horas})}{1000}$$

$$\text{consumo de energía}(kWh) = 0.0635 kWh$$

Como resultado se tiene que el consumo de energía generado por la estación en el proceso de carga del UAV es de 63.50 vatios-hora. El costo del proceso de carga se consigue multiplicando el consumo en kilovatio-hora por el costo de la energía en Ambato.

$$\text{costo por carga} = 0.0635 \frac{kWh}{carga} * \frac{10ctvs}{kWh}$$

$$\text{costo} = 0.635 ctvs$$

Suponiendo que se realicen misiones de similar exigencia para el UAV a lo largo de un día, con un tiempo de vuelo de 30 minutos y operando durante 8 horas laborales, se deben realizar 4 procesos de carga diarios. Esto resulta en un costo diario de aproximadamente 2.54 dólares por consumo de energía, lo que suma un total mensual de 76.20 dólares.

El balanceador utilizado para la carga convencional consume un total de 0.0590 kWh, lo que resulta en un costo más bajo en su implementación. Sin embargo, debido a la falta de un sistema de telemetría, requiere atención constante de un operador y no permite controlar ni prever posibles fallos.

3.4 Presupuesto

En la construcción de un sistema de carga inalámbrica telemetrizada utilizando tecnología inteligente para vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la Universidad Técnica de Ambato, el costo final del prototipo asciende a \$629,64. En la Tabla 44, se presenta un desglose de los precios de los distintos elementos:

Tabla 44. Presupuesto

Elemento	Cantidad	Precio (\$)
Estación de carga		
Fabricación de la estación de carga / corte laser	1	35
Raspberry Pi 4 Modelo B	1	140
ESP32 + Shield	1	24.50
Motor a pasos NEMA17	4	72
Modulo A4988	4	20
Regleta	1	6.40
Fuente de 12 Voltios	2	16.40
Sensor de corriente AC SCT-013-015 no invasivo	1	15
Sensor de voltaje DC FZ0430	1	5
Sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712	1	5
ADS1115 Conversor Análogo a digital	1	9.75
Módulos de carga inalámbrica		
XKT-801 y XKT3170	1	40
Fuente de alimentación 24 V 2A	1	6.90
Cable Litz AWG 15	6 metros	38.82
UAV		
Módulos de telemetría 3DR	1	50.99
Fabricación de la estructura para el circuito de conmutación y RX	1	26.75
Circuito de conmutación	1	35
	SUBTOTAL	547.51
	IVA (15%)	82.13
	TOTAL	629.64

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El proceso de carga tradicional por cable de los UAV's en la Universidad Técnica de Ambato se extiende a 5540 segundos, la mayor parte del tiempo dedicado a la carga de baterías LiPo de 3 celdas (1.3 amperios, 11.1 voltios), es de 5400 segundos. Los restantes 140 segundos implican tareas manuales que aumentan el riesgo de errores y daños.
- Dado que la autonomía de vuelo de los UAV's varía entre 25 y 30 minutos, es necesario repetir el proceso de carga varias veces al día, lo que desgasta los cables y conectores. Este sistema de carga se revela ineficiente en términos de recursos materiales, tiempo y mano de obra, además de limitar la autonomía y la versatilidad de los UAV's en diversos escenarios operativos.
- El diseño de la estación de carga inalámbrica con la integración de telemetría permite el monitoreo remoto en tiempo real del proceso de carga, este diseño se realizó en función de la transferencia de energía de forma inductiva aplicando sensores con tarjetas de adquisición de datos para la detección del consumo general en vatios de la estación de carga. En el UAV se determinó el uso de módulos de comunicación RF para el monitoreo constante del UAV y su fuente de alimentación.
- La aplicación de un servidor LAMP para el almacenamiento de los datos y el protocolo de comunicación MQTT instalado en la Raspberry Pi permitió la visualización de datos en un dashboard configurado en Grafana. En conjunto, este diseño proporcionó una plataforma confiable para supervisar y analizar el rendimiento de la estación de carga y el UAV, mejorando la eficiencia del sistema y permitiendo un mantenimiento predictivo para una gestión óptima del proceso de carga.
- La construcción de la estación telemetrizada de carga inalámbrica mediante el uso de tecnología inteligente demostró ser una solución innovadora y eficaz

para incrementar la autonomía de vuelo de los vehículos aéreos no tripulados (UAV's) de la Universidad Técnica de Ambato. Con la integración del sistema de transferencia de potencia inductiva, monitoreo en tiempo real y control automatizado proporciona una forma eficiente de carga de las baterías sin la necesidad de conexiones físicas y reduciendo en 90% la necesidad de la intervención humana.

4.2 Recomendaciones

- La transferencia de energía inalámbrica puede interferir con otros equipos electrónicos, por lo que es fundamental asegurar que la estación de carga esté aislada electromagnéticamente y que el UAV cuente con sistemas de protección contra posibles interferencias. Para mejorar la guía del campo magnético en las bobinas, se puede utilizar papel ferromagnético. Además, se recomienda emplear filtros pasivos de ferrita y EMI para suprimir el ruido y reducir las emisiones no deseadas. Es aconsejable usar materiales como láminas de cobre o aluminio para crear blindajes efectivos alrededor de los componentes sensibles del UAV, garantizando una operación segura y estable.
- Al diseñar el sistema de carga inalámbrica para UAV's, se debe considerar la capacidad de carga del dron. La bobina receptora y sus componentes deben ser lo suficientemente ligeros para no comprometer la estabilidad y el rendimiento del UAV. Se recomienda utilizar materiales livianos y compactos, y realizar pruebas de vuelo para asegurarse que el peso adicional no afecte la maniobrabilidad ni la duración del vuelo del UAV.
- Para optimizar el rendimiento de los módulos de telemetría 3DR en la estación de carga inalámbrica para los UAV's, se recomienda configurarlos para operar a una frecuencia de 915 MHz, la cual está permitida en Ecuador y ofrece un equilibrio adecuado entre alcance y penetración de la señal. Es crucial mantener actualizado el firmware de los módulos de telemetría y utilizar herramientas como Mission Planner para ajustes precisos. En esta plataforma, se debe configurar la potencia de los módulos a 500 milivatios, para alcanzar distancias óptimas de entre 8 y 10 km. Por defecto, el software tiene una

configuración de 100 milivatios, lo cual limita el alcance a 1 y 3 km. Estas medidas garantizan un funcionamiento eficaz del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Sarkar, A. Kumar y M. Totaro, «An intelligent framework for prediction of a UAV's», de *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Lafayette, 2020.
- [2] ONEPOINTECH, «Solución de carga inalámbrica industrial de larga distancia ONE POINTECH 200W,» 20 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://onepointech.com/es/long-distance-200w-industrial-wireless-charging-solution/>.
- [3] M. Rodríguez, «Telemetría energética,» 13 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://e-management.mx/2013/09/13/telemetria-energetica/>. [Último acceso: 7 Noviembre 2023].
- [4] M. Duque y G. Romero, «Entorno de control implementado en una Smart-Grid como alternativa de ahorro energético para Ecuador,» de *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering Innovations for*, San José, 2016.
- [5] P. K. Chittor, B. Chokkalingam y L. Mihet-Popa, «A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards,» *IEEE access*, vol. 9, pp. 69235-69266, 2021.
- [6] S. Wu, C. Cai, L. Jiang, J. Li y S. Yang, «Unmanned Aerial Vehicle Wireless Charging System With Orthogonal Magnetic Struture and Position Correction Aid Device,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 6, nº 7, pp. 7564-7575, 2021.

- [7] Z. Wei, B. Liu, Z. Lan, B. Wu, S. Li y M. Yu, «Optimum Design of Wireless Charging System Based on Magnetic Coupling,» *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, pp. 44-48, 2019.

- [8] Campi, Cruciani, Maradei y Feliziani, «Wireless Charging System Integrated in a Small Unmanned Aerial Vehicle (UAV) with High Tolerance to Planar Coil Misalignment,» *EMC Sapporo & APEMC 2019*, pp. 601-604, 2019.

- [9] J. Aqeel, J. Haider, N. Rosdiadee, G. Sadik, A. Nor y A.-A. Mahmood, «Wireless Power Transfer With Magnetic Resonator Coupling and Sleep/Active Strategy for a Drone Charging Station in Smart Agriculture,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 139839 - 139851, 2019.

- [10] F. Salazar, M. S. Martínez-García, A. de Castro, C. Chávez-Fuentes, M. Cazorla, J. d. P. Ureña-Aguirre y S. Altamirano, «UAVs for Business Adoptions in Smart City Environments: Inventory Management System,» *Electronics*, vol. 12, nº 9, p. 2090, 2023.

- [11] F. M. Cango y F. Salazar, «SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE PERSONAS EN CATÁSTROFES UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV'S),» Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/40773>. [Último acceso: 24 Marzo 2024].

- [12] D. L. Piñeros Guzmán y A. F. Gómez Rivera, «Metodología de validación de autonomía de batería para un UAV táctico,» *Ciencia y poder aéreo*, vol. 18, nº 2, pp. 20-34, 2023.

- [13] A. M. Le, L. H. Truong, T. V. Quyen, C. V. Nguyen y M. T. Nguyen, «Wireless Power Transfer Near-field Technologies for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Review,» *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 7, n° 22, pp. e5-e5, 2020.
- [14] H. Ucgun, U. Yuzgec y C. Bayilmis, «A review on applications of rotary-wing unmanned aerial vehicle charging stations,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 18, n° 3, p. 17298814211015863, 2021.
- [15] S. A. Mohsan, N. Q. H. Othman, A. M. Khan, H. Amjad y J. Żywiołek, «A Comprehensive Review of Micro UAV Charging Techniques,» *Micromachines*, vol. 13, n° 6, p. 977, 2022.
- [16] K. Detka y K. Górecki, «Wireless Power Transfer—A Review,» *Energies*, vol. 15, n° 19, p. 7236, 2022.
- [17] M. B. Sidiku, E. M. Eronu y E. C. Ashigwuike, «A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme,» *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, vol. 39, n° 4, pp. 1206-1215, 2020.
- [18] A. Manesh, B. Chokkalingam y L. Mihet-Popa, «Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles - A review,» *IEEE access*, vol. 9, pp. 137667-137713, 2021.
- [19] S. Jayalath y A. Khan, «Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, n° 5, pp. 6196-6218, 2020.

- [20] X. d. T. García, J. Vázquez y P. Roncero-Sánchez, «Design, implementation issues and performance of an inductive power transfer system for electric vehicles chargers with series-series compensation,» *IET Power Electronics*, vol. 8, nº 10, pp. 1920-1930, 2015.
- [21] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally y S. I. Seleem, «Wireless charging technologies for electric vehicles: Inductive, capacitive, and magnetic gear,» *IET Power Electronics*, vol. 17, nº 6, 2023.
- [22] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally y S. I. Seleem, «An overview of dynamic inductive charging for electric vehicles,» *Energies*, vol. 15, nº 15, p. 5613, 2022.
- [23] S. Varikkottil, F. D. J. Lionel, M. K. Srinivasan, S. Williamson, R. Kannan y L. I. Izhar, «Role of Power Converters in Inductive Power Transfer System for Public Transport—A Comprehensive Review,» *Symmetry*, vol. 14, nº 3, p. 508, 2022.
- [24] N. N. Nanda, S. H. Yusoff, S. F. Toha, N. F. Hasbullah y A. S. Roszaidie, «A brief review: basic coil designs for inductive power transfer,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, nº 3, pp. 1703-1716, 2020.
- [25] I. Hussain y D.-K. Woo, «Self-inductance calculation of the archimedean spiral coil,» *Energies*, vol. 15, nº 1, p. 253, 2021.
- [26] A. Delgado-Expósito, Analysis and Guidelines for Inductive Power Transfer Links Design. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM), 2021.

- [27] R. Granillo Macias , G. Téllez López, J. López Jiménez y A. Contreras Juárez, «Uso de la telemetría en la administración del transporte,» *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 7, nº 13, pp. 71-74, 2020.
- [28] M. Ball, «Unmanned Systems Technology,» 24 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2023/08/satellite-telemetry-ai-powered-image-processing-solutions-for-uavs/>. [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [29] M. Torres-Rivera, I. Olvera-Blas, A. Ramon-Mendoza, A. Olivera-Barcenas, G. Ramirez-Villa y I. Matin-Felipe, «Estudio comparativo de sensores durante navegacion por waypoints en cuadricóptero,» *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 11, nº Especial4, pp. 171-177, 2023.
- [30] O. R. Rodríguez Gutiérrez, «Herramienta de visualización de datos para aplicaciones de IoT,» 2019.
- [31] J. Martínez, «OpenWebinars,» 27 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://openwebinars.net/blog/que-es-grafana-y-primeros-pasos/>. [Último acceso: 27 Abril 2024].
- [32] S. Quincozes, J. Kazienko y E. Tubino, «MQTT Protocol: Fundamentals, Tools and Future Directions,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, nº 9, pp. 1439-1449, 2019.
- [33] «Foro de Huawei Enterprise,» 31 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/protocolo->

coap/thread/667241330188894208-667212896255488000. [Último acceso: 27 Abril 2024].

[34] V. Seixas, «Azion,» 21 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.azion.com/es/blog/que-es-http-y-como-funciona/>. [Último acceso: 27 Abril 2024].

[35] S. Borges, «Infranetworking,» 9 Junio 2020. [En línea]. Available: https://blog.infranetworking.com/servidor-lamp/#Que_es_un_servidor_LAMP. [Último acceso: 27 Abril 2024].

[36] S. Nair, A. Shetty, N. Maurya y I. Scurtu, «Effective Techniques for Wireless Charging for Unmanned Aerial Vehicles (UAV),» *Technium*, vol. 3, nº 1, pp. 128-137, 2021.

[37] Z. Song, X. Zhang, X. Zhang, R. Xing y L. Wang, «A wireless power transfer system with switching circuit of power grid and solar energy,» *Communications, Signal Processing, and Systems: Proceedings of the 8th International Conference on Communications, Signal, Processing, and Systems*, pp. 564-571, 2020.

[38] G. Mao, Z. Zhou, H. Su, Y. Chen, J. Zhang, C. Zhang, Z. Wang y X. Lü, «A fully implantable and programmable epidural spinal cord stimulation system for rats with spinal cord injury,» *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 31, pp. 818-828, 2023.

ANEXOS

Anexo A. Pruebas de vuelo del UAV con la carga tradicional

En la Figura A1 se presenta las pruebas de vuelo que se realizaron con el UAV para de determinar el consumo de la batería con la carga tradicional por cable.



Figura A1. Pruebas de vuelo del UAV

Anexo B. Esquema de conexiones de los sensores

En la Figura B1 se muestra el esquema de conexión del sensor de corriente DC de efecto Hall ACS712.

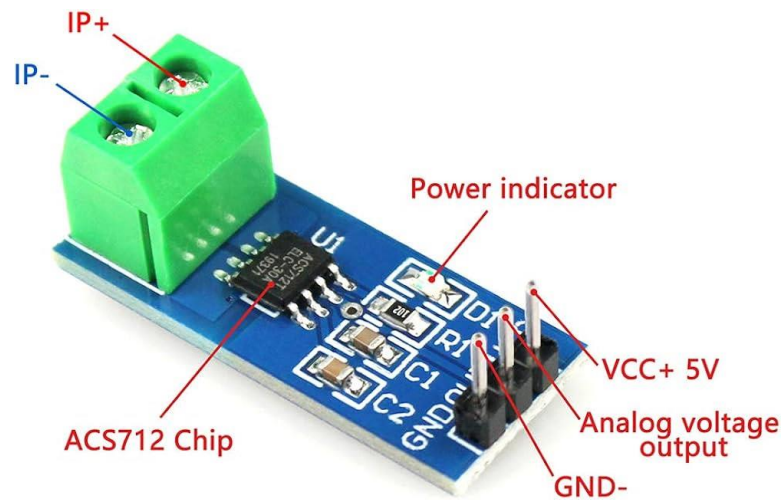


Figura B1. Esquema de conexión del sensor ACS712

En la Figura B2 se muestra el esquema de conexión del sensor de voltaje DC FZ0430.



Figura B2. Esquema de conexión del sensor DC FZ0430

En la Figura B3 se muestra el esquema de conexión del sensor de voltaje DC FZ0430.

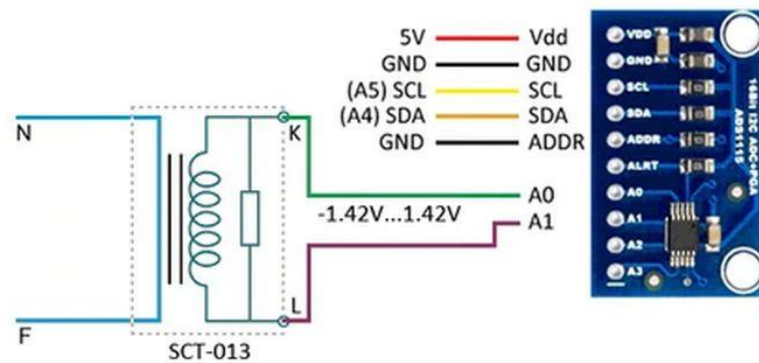


Figura B3. Esquema de conexión del sensor AC SCT-013-015

En la Figura B4 se presenta el diagrama de cableado de módulos y sensores en el UAV.

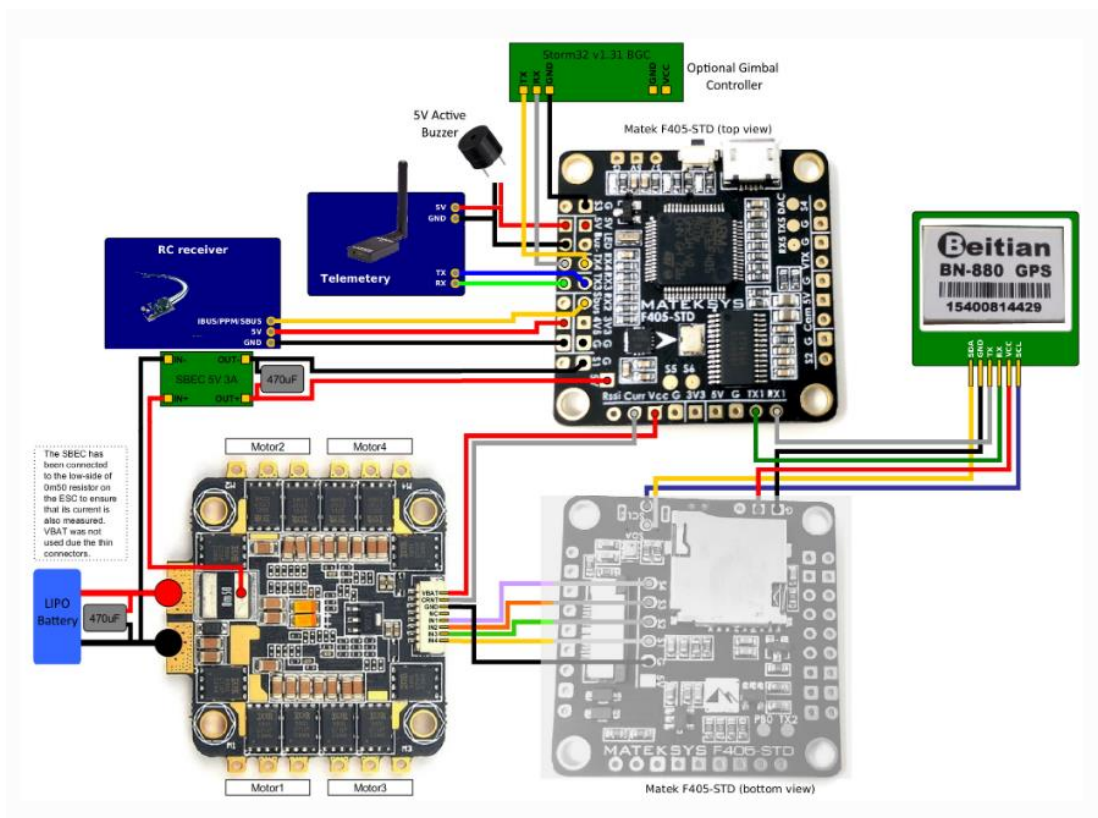


Figura B4. Esquema general de cableado de módulos y sensores

Anexo C. Diagramas de plataformas de desarrollo embebido

En Figura C1 se muestra el diagrama de la ESP32.

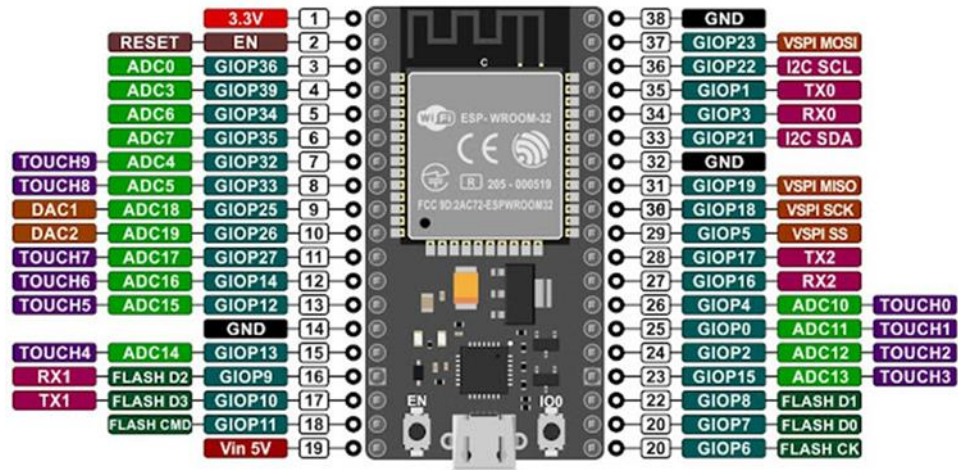


Figura C1. Diagrama de la ESP32

En Figura C2 se muestra el diagrama del Arduino Nano.

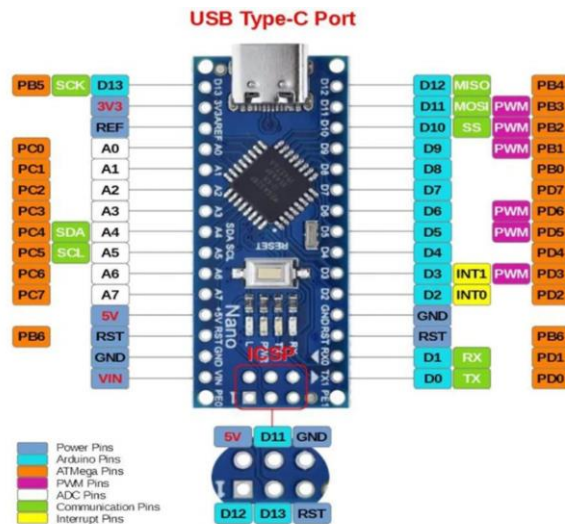


Figura C2. Diagrama del Arduino Nano

En la Figura C3 se presenta el esquemático de la Raspberry Pi 4 modelo B.

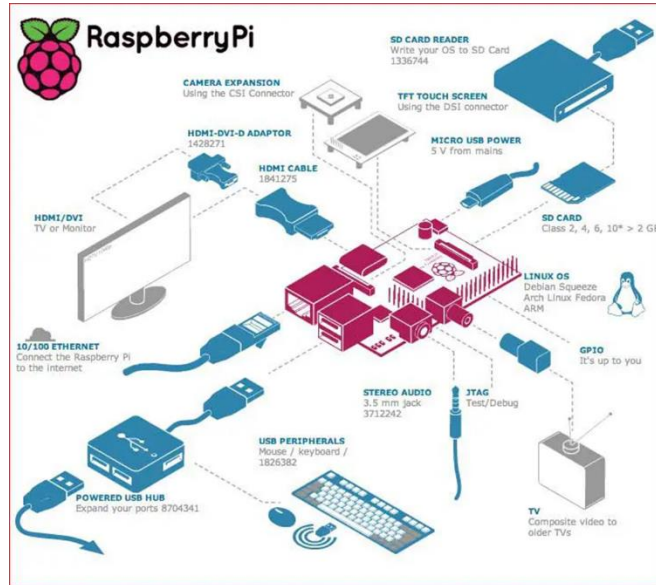


Figura C3. Esquemático de la Raspberry Pi 4 modelo B

En la Figura C4 se presenta las especificaciones de la Raspberry Pi 4 modelo B.

Especificaciones

Broadcom BCM2711, SoC de cuatro núcleos Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits a 1,8 GHz
 SDRAM LPDDR4-3200 de 1GB, 2GB, 4GB u 8GB (según modelo)
 IEEE 802.11ac inalámbrico de 2,4 GHz y 5,0 GHz, Bluetooth 5.0, BLE
 Gigabit Ethernet
 2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0.
 Conector GPIO estándar de 40 pines Raspberry Pi (totalmente compatible con placas anteriores)
 2 x puertos micro-HDMI® (se admiten hasta 4kp60)
 Puerto de pantalla MIPI DSI de 2 carriles
 Puerto de cámara MIPI CSI de 2 carriles
 Puerto de audio estéreo y vídeo compuesto de 4 polos
 H.265 (decodificación 4kp60), H264 (decodificación 1080p60, codificación 1080p30)
 OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0
 Ranura para tarjeta Micro-SD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos
 5 V CC a través del conector USB-C (mínimo 3 A*)
 5 V CC a través del conector GPIO (mínimo 3 A*)
 Alimentación a través de Ethernet (PoE) habilitada (requiere PoE HAT separado)
 Temperatura de funcionamiento: 0 – 50 grados C ambiente

* Se puede utilizar una fuente de alimentación de 2,5 A de buena calidad si los periféricos USB de descarga consumen menos de 500 mA en total.

Figura C4. Especificaciones de la Raspberry Pi 4

Anexo D. Placa controladora de vuelo

En la Figura D1 el esquema de la placa de controladora de vuelo.

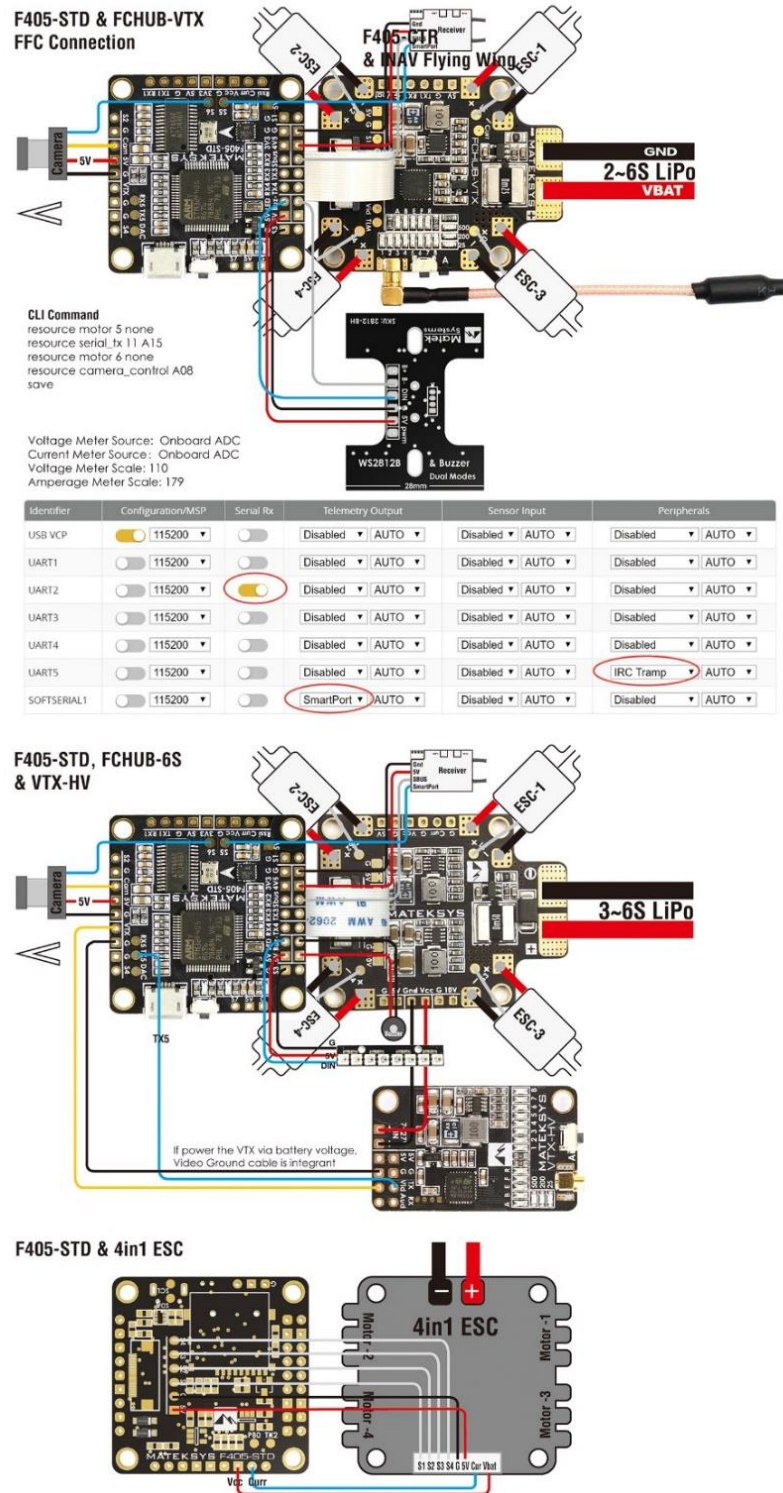


Figura D1. Placa MatekF405-STD

Anexo E. Código de la estación de carga

A continuación, se presenta el código que se utilizó para la estación de carga.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <HTTPClient.h>

// Configuración del ADS1115
Adafruit_ADS1115 ads;
const float FACTOR = 50;
const float multiplicador = 0.0625F;
const int voltajeMax = 24000;
int lecturaDigital;
float voltajeDC;

// Configuración de red WiFi
const char* ssid = "*****";
const char* password = "*****";

// Configuración del servidor MQTT
const char* mqtt_server = "192.168.0.1";
const int mqtt_port = 1883;
const char* mqtt_user = "*****";
const char* mqtt_password = "*****";
const char* mqtt_topic_corrienteAC = "Estacion/CorrienteAC";
const char* mqtt_topic_potenciaAC = "Estacion/PotenciaAC";
const char* mqtt_topic_corrienteDC = "Estacion/CorrienteDC";
const char* mqtt_topic_potenciaDC = "Estacion/PotenciaDC";
const char* mqtt_topic_voltajeDC = "UAV/voltaje";

// Dirección del servidor PHP
const char* serverAddress_AC = "http://192.168.0.1/insert_data1.php";
const char* serverAddress_DC = "http://192.168.0.1/insert_data.php";

// Variables de promedio
float currentSum_AC = 0.0;
float powerSum_AC = 0.0;
int count_AC = 0;
unsigned long lastMillis_AC = 0;

float currentSum_DC = 0.0;
float powerSum_DC = 0.0;
int count_DC = 0;
unsigned long lastMillis_DC = 0;

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
WiFiClient http_client;

float globalVoltaje = 0.0;

void setup_wifi() {
  delay(10);
```

```

Serial.println();
Serial.print("Conectando a ");
Serial.println(ssid);

WiFi.begin(ssid, password);

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}

Serial.println("");
Serial.println("WiFi conectado");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void reconnect() {
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("Conectando al servidor MQTT...");
        if (client.connect("ESP32Client", mqtt_user, mqtt_password)) {
            Serial.println("conectado");
            client.subscribe(mqtt_topic_voltajeDC);
        } else {
            Serial.print("failed, rc=");
            Serial.print(client.state());
            Serial.println(" intentando de nuevo en 5 segundos");
            delay(5000);
        }
    }
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    payload[length] = '\0';
    String message = String((char*)payload);
    globalVoltaje = message.toFloat();

    Serial.print("Mensaje recibido en el t3pico ");
    Serial.print(topic);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(message);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200); // Iniciar la comunicaci3n serie a 115200 bps
    ads.setGain(GAIN_TWO);
    ads.begin();

    pinMode(26, OUTPUT);

    setup_wifi();
    client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
    client.setCallback(callback);
}

void loop() {
    if (!client.connected()) {
        reconnect();
    }
}

```

```

client.loop();

if (globalVoltaje < 12){
digitalWrite(26,0);
} else if (globalVoltaje > 12){
digitalWrite(26,1);
}

// Lectura y cálculo de corriente y potencia AC
float corrienteAC = getCorrienteAC();
float potenciaAC = 110.0 * corrienteAC;

// Lectura de voltaje DC
lecturaDigital = analogRead(4);
float voltajeDC = 24.0;

Serial.print("Corriente AC: " + String(corrienteAC, 4) + "A, ");
Serial.print("Potencia AC: " + String(potenciaAC, 4) + "W, ");
Serial.println("VoltajeDC: " + String(voltajeDC, 4) + "V");

client.publish(mqtt_topic_corrienteAC, String(corrienteAC, 4).c_str());
client.publish(mqtt_topic_potenciaAC, String(potenciaAC, 4).c_str());
client.publish("Estacion/VoltajeDC", String(voltajeDC, 4).c_str());

// Promedio de corriente y potencia AC
currentSum_AC += corrienteAC;
powerSum_AC += potenciaAC;
count_AC++;

// Enviar datos de corriente y potencia DC
float corrienteDC = getCorrienteDC();
float potenciaDC = voltajeDC * corrienteDC;

if (corrienteDC >= 0) {
    currentSum_DC += corrienteDC;
    powerSum_DC += potenciaDC;
    count_DC++;
}

Serial.print("Corriente DC: ");
Serial.print(corrienteDC, 3);
Serial.println(" A");

Serial.print("Potencia DC: ");
Serial.print(potenciaDC, 3);
Serial.println(" W");

if (corrienteDC > 0) {
    client.publish(mqtt_topic_corrienteDC, String(corrienteDC, 3).c_str());
    client.publish(mqtt_topic_potenciaDC, String(potenciaDC, 3).c_str());
}

unsigned long currentTime = millis();
if (currentTime - lastMillis_AC >= 300000) { // Cada 5 minutos para AC
    float avgCurrent_AC = currentSum_AC / count_AC;
    float avgPower_AC = powerSum_AC / count_AC;

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

```

```

    HTTPClient http;
    String postData_AC = "corriente=" + String(avgCurrent_AC, 4) + "&potencia=" +
String(avgPower_AC, 4);
    http.begin(http_client, serverAddress_AC);
    http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");
    int httpResponseCode = http.POST(postData_AC);

    if (httpResponseCode > 0) {
        Serial.print("HTTP Response code: ");
        Serial.println(httpResponseCode);
    } else {
        Serial.print("Error en la solicitud HTTP: ");
        Serial.println(httpResponseCode);
    }
    http.end();
} else {
    Serial.println("No conectado a WiFi");
}

currentSum_AC = 0.0;
powerSum_AC = 0.0;
count_AC = 0;
lastMillis_AC = currentTime;
}

if (currentTime - lastMillis_DC >= 60000) { // Cada minuto para DC
    float avgCurrent_DC = currentSum_DC / count_DC;
    float avgPower_DC = powerSum_DC / count_DC;

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        String url_DC = String(serverAddress_DC) + "?current=" + String(avgCurrent_DC, 3) +
"&power=" + String(avgPower_DC, 3);
        http.begin(url_DC);
        int httpResponseCode = http.GET();

        if (httpResponseCode > 0) {
            String response = http.getString();
            Serial.println("Respuesta del servidor: " + response);
        } else {
            Serial.println("Error en la conexión HTTP");
        }
        http.end();
    } else {
        Serial.println("No conectado a WiFi");
    }
}

currentSum_DC = 0.0;
powerSum_DC = 0.0;
count_DC = 0;
lastMillis_DC = currentTime;
}

delay(1000); // Esperar 1 segundo antes de la siguiente lectura
}

float getCorrienteAC() {
    float Volt_diferencial;
    float corriente;

```

```

float sum = 0;
long tiempo = millis();
int contador = 0;

while (millis() - tiempo < 100) {
  Volt_diferencial = ads.readADC_Differential_0_1() * multiplicador;
  corriente = Volt_diferencial * FACTOR;
  corriente /= 1000.0;
  sum += sq(corriente);
  contador++;
}

corriente = sqrt(sum / contador);
return corriente;
}

float getCorrienteDC() {
  int sensorPin = 34; // Ajustar al pin adecuado
  float VREF = 3.3; // Voltaje de referencia
  int ADC_MAX = 4095; // Resolución ADC de 12 bits
  float sensitivity = 0.185; // Sensibilidad del sensor

  int sensorValue = analogRead(sensorPin);
  float sensorVoltage = (sensorValue / (float)ADC_MAX) * VREF;
  float current = (((sensorVoltage - (VREF / 2)) / sensitivity))+0.9;

  return current;
}

```

Anexo F. Código de los datos del UAV

Para obtener los datos del UAV, se utilizó el siguiente código.

```
from pymavlink import mavutil
import time
import paho.mqtt.client as mqtt
import json
from threading import Timer
import pymysql
import pytz
from datetime import datetime

# Configuración de la base de datos
db_host = "192.168.0.1"
db_user = "*****"
db_password = "*****"
db_name = "STCIU"

# Configuración del cliente MQTT
broker_address = "192.168.0.1"
broker_port = 1883
username = "*****"
password = "*****"

# Crear cliente MQTT
mqtt_client = mqtt.Client("DroneClient")
mqtt_client.username_pw_set(username, password)
mqtt_client.connect(broker_address, broker_port, 60)

# Conexión a la base de datos
db_connection = pymysql.connect(host=db_host, user=db_user, password=db_password,
database=db_name)
db_cursor = db_connection.cursor()

# Función para conectar con el dron
def connect_drone(connection_string, baud_rate):
    print("Conectando con el dron en: {} a una velocidad de {} baudios".format(connection_string,
baud_rate))
    return mavutil.mavlink_connection(connection_string, baud=baud_rate)

# Función para mostrar los datos del dron
def show_drone_data(vehicle):
    vehicle.wait_heartbeat()

    # Solicitar datos de telemetría
    vehicle.mav.request_data_stream_send(vehicle.target_system, vehicle.target_component,
mavutil.mavlink.MAV_DATA_STREAM_ALL, 1, 1)

    # Leer datos de telemetría
    msg = vehicle.recv_match(type='VFR_HUD', blocking=True)
    if not msg:
        return None

    altitud = msg.alt
    velocidad = msg.groundspeed
```

```

msg = vehicle.recv_match(type='SYS_STATUS', blocking=True)
if not msg:
    return None

voltaje = msg.voltage_battery / 1000.0
corriente = msg.current_battery / 100.0
porcentaje_bat = msg.battery_remaining

msg = vehicle.recv_match(type='GLOBAL_POSITION_INT', blocking=True)
if not msg:
    return None

latitud = msg.lat / 1.0e7
longitud = msg.lon / 1.0e7

msg = vehicle.recv_match(type='HEARTBEAT', blocking=True)
if not msg:
    return None

modo = mavutil.mode_string_v10(msg)

ubicacion = json.dumps({"latitud": latitud, "longitud": longitud})

print(f"Altitud: {altitud} metros")
print(f"Velocidad: {velocidad} m/s")
print(f"Estado de la bateria: {voltaje} V, {corriente} A, {porcentaje_bat} %")
print(f"Ubicacion: {ubicacion}")
print(f"Modo: {modo}")

mqtt_client.publish("UAV/voltaje", voltaje)
mqtt_client.publish("UAV/corriente", corriente)
mqtt_client.publish("UAV/altitud", altitud)
mqtt_client.publish("UAV/velocidad", velocidad)
mqtt_client.publish("UAV/modo", modo)
mqtt_client.publish("UAV/latitud", latitud)
mqtt_client.publish("UAV/longitud", longitud)
mqtt_client.publish("UAV/ubicacion", ubicacion)

return altitud, velocidad, voltaje, corriente, porcentaje_bat, modo, latitud, longitud

# Conexión al vehículo (modifica la cadena de conexión según tu configuración)
connection_string = "COM10" # Por ejemplo, para una conexión serial en Raspberry Pi
baud_rate = 57600

def connect_with_retry(connection_string, baud_rate):
    while True:
        try:
            vehicle = connect_drone(connection_string, baud_rate)
            print("Conexión exitosa.")
            return vehicle
        except Exception as e:
            print(f"Fallo en la conexión: {e}. Esperando para reconectar...")
            time.sleep(5) # Esperar 5 segundos antes de intentar reconectar

vehicle = connect_with_retry(connection_string, baud_rate)

def send_to_database(voltaje):
    ecuador_tz = pytz.timezone('America/Guayaquil')

```

```

ecuador_time = datetime.now(ecuador_tz)
formatted_time = ecuador_time.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
query = "INSERT INTO UAV (Tiempo, Voltaje) VALUES (%s, %s)"
values = (formatted_time, voltaje)
db_cursor.execute(query, values)
db_connection.commit()

def send_data():
    global vehicle
    try:
        altitud, velocidad, voltaje, corriente, porcentaje_bat, modo, latitud, longitud =
show_drone_data(vehicle)
        Timer(1.0, send_data).start() # Llamar a send_data cada segundo para enviar datos de MQTT
en tiempo real
    except Exception as e:
        print(f"Error al enviar datos: {e}. Reconectando...")
        vehicle = connect_with_retry(connection_string, baud_rate)
        send_data()

def send_voltage_to_db():
    global vehicle
    try:
        _, _, voltaje, _, _, _, _ = show_drone_data(vehicle)
        send_to_database(voltaje)
        Timer(60.0, send_voltage_to_db).start() # Llamar a send_voltage_to_db cada minuto para
enviar el voltaje a la base de datos
    except Exception as e:
        print(f"Error al enviar voltaje a la base de datos: {e}. Reconectando...")
        vehicle = connect_with_retry(connection_string, baud_rate)
        send_voltage_to_db()

try:
    send_data()
    send_voltage_to_db()

except KeyboardInterrupt:
    print("Operación cancelada por el usuario.")
    vehicle.close()
    db_connection.close()
    print("Conexiones cerradas.")

```

Anexo G. Código para publicación de datos en MYSQL de la estación

Para la publicación de datos en MYSQL de la estación se utiliza el siguiente código.

```
<?php
$servername = "localhost";
$username = "*****";
$password = "*****";
$dbname = "STCIU";

// Crear conexión
$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);

// Verificar conexión
if ($conn->connect_error) {
    die("Conexión fallida: " . $conn->connect_error);
}

if (isset($_GET['current']) && isset($_GET['power'])) {
    $current = $_GET['current'];
    $power = $_GET['power'];

    // Establecer la zona horaria de Ecuador
    date_default_timezone_set('America/Guayaquil');
    $ecuador_time = date('Y-m-d H:i:s');

    $sql = "INSERT INTO EstaciónDC (CorrienteDC, PotenciaDC, Tiempo) VALUES ('$current',
'power', '$ecuador_time')";

    if ($conn->query($sql) === TRUE) {
        echo "Datos insertados correctamente";
    } else {
        echo "Error: " . $sql . "<br>" . $conn->error;
    }
} else {
    echo "Faltan parámetros";
}

$conn->close();
?>
```

Anexo H. Código PHP para publicación de datos en MYSQL del UAV

El siguiente código PHP es utilizado para la publicación de datos en MYSQL del UAV.

```
<?php
$servername = "localhost";
$username = "*****";
$password = "*****";
$dbname = "STCIU";

// Crear conexión
$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);
// Verificar conexión
if ($conn->connect_error) {
    die("Conexión fallida: " . $conn->connect_error);
}

// Obtener datos del POST
$corriente = $_POST["corriente"];
$potencia = $_POST["potencia"];

// Establecer la zona horaria de Ecuador
date_default_timezone_set('America/Guayaquil');
$ecuador_time = date('Y-m-d H:i:s');

// Insertar datos en la tabla
$sql = "INSERT INTO EstaciónAC (CorrienteAC, PotenciaAC, Tiempo) VALUES ('$corriente', '$potencia', '$ecuador_time')";

if ($conn->query($sql) === TRUE) {
    echo "Datos insertados correctamente";
} else {
    echo "Error al insertar datos: " . $conn->error;
}

$conn->close();
?>
```

Anexo I. Circuito conmutador

En la Figura I1 y en la Figura I2, se presenta el circuito conmutador que se realizó, el cual fue diseñado en el software Proteus.

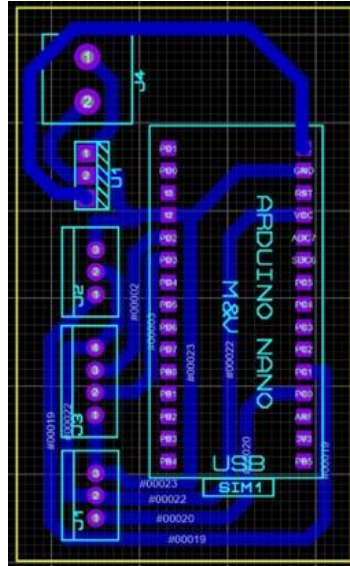


Figura I1. Simulación del circuito conmutador

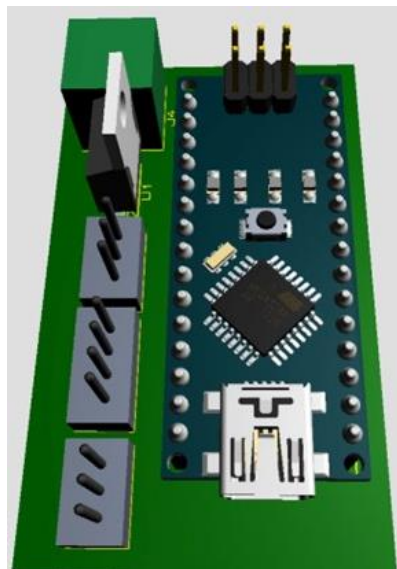


Figura I2. Placa PCB del circuito conmutador

Anexo J. Código del circuito de conmutación

Para el circuito de conmutación se utilizó el siguiente código.

```
const int voltajeMax = 25000;
int lecturaDigitalB;
float voltajeB;
int lecturaDigitalL;
float voltajeL;
int pincarga = 3;
int pinbateria = 2;

void setup(){
  pinMode(pincarga, OUTPUT);
  pinMode(pinbateria, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
}

void loop(){
  lecturaDigitalB = analogRead(A0);
  voltajeB = map(lecturaDigitalB, 0, 1023, 0, voltajeMax) / 1000.0;
  Serial.println("Voltaje en la Bobina: "+ String(voltajeB));

  lecturaDigitalL = analogRead(A1);
  voltajeL = map(lecturaDigitalB, 0, 1023, 0, voltajeMax) / 1000.0;
  Serial.println("Voltaje en la Batería: "+ String(voltajeL));

  if (voltajeB >= 6){
    if (voltajeL <= 11.1){
      digitalWrite(pincarga, 0);
      digitalWrite(pinbateria, 0);
      delay(500);
    }
    else{
      digitalWrite(pincarga, 1);
      digitalWrite(pinbateria, 1);
      delay(500);
    }
  }
  else {
    digitalWrite(pincarga, 1);
    digitalWrite(pinbateria, 1);
    delay(500);
  }
}
```

Anexo K. Pruebas de vuelo del UAV con la carga inalámbrica incorporada.

En la Figura K1, K2 y K3 se presentan las pruebas de vuelo del UAV implementada la carga inalámbrica para poder determinar el consumo de la batería.



Figura K1. Prueba de vuelo con la carga inalámbrica



Figura K2. Prueba de vuelo con la carga inalámbrica



Figura K3. Prueba de vuelo implementada la carga inalámbrica en el UAV

Anexo L. Construcción de las bobinas

En la Figura L1 se visualiza la construcción de las bobinas, las cuales fueron realizadas con cable esmaltado de cobre.



Figura L1. Construcción de las bobinas con el cable de cobre esmaltado

Anexo M. Pruebas de funcionamiento de las bobinas

Para las pruebas de funcionamiento de las bobinas se realizaron a distintas distancias, combinas entre calibre y tipo de cable como se visualiza en la Figura M1, Figura M2 y Figura M3.

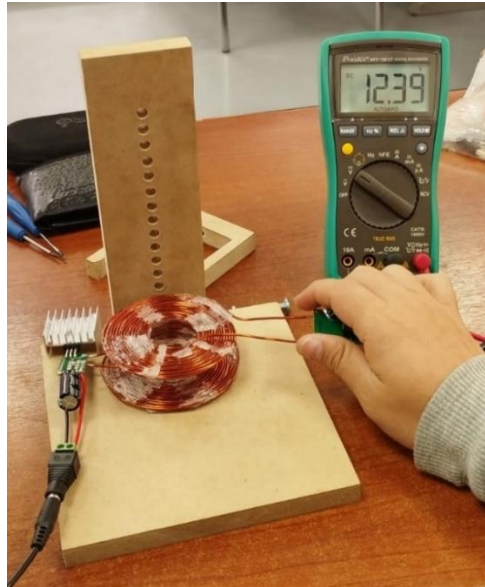


Figura M1. Prueba de funcionamiento con las dos bobinas de cable de cobre esmaltado calibre 15

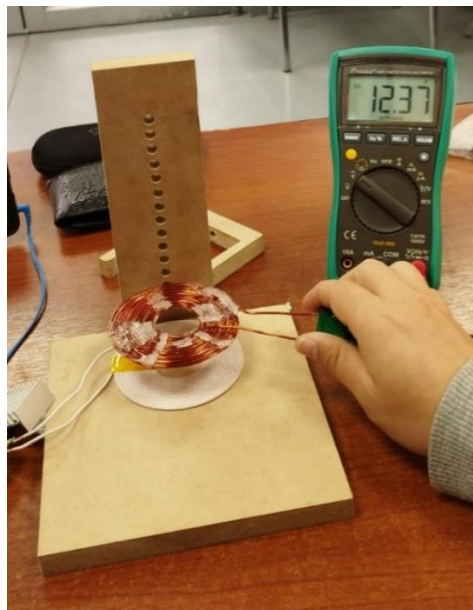


Figura M2. Prueba de funcionamiento con bobinas de cable de cobre esmaltado y cable Litz de calibre 15

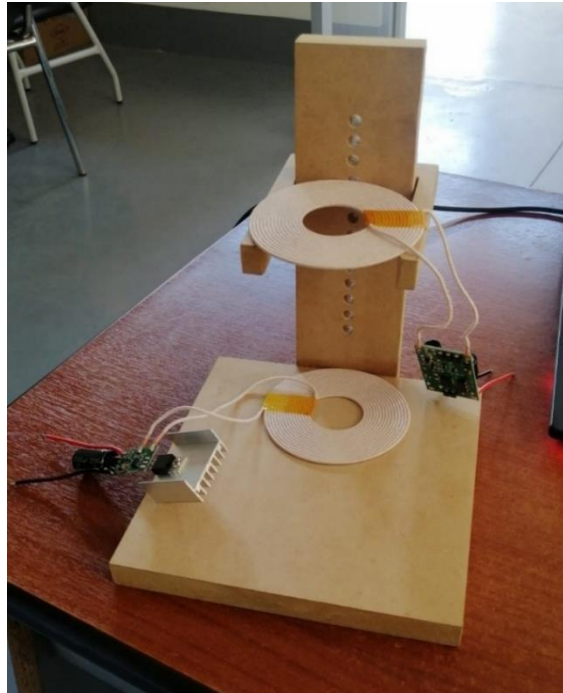


Figura M3. Prueba de funcionamiento con bobinas de cable Litz de calibre 15

Anexo N. Toma de datos de las bobinas

En la Figura N1 se presenta los datos obtenidos de la bobina Receptora, la cual ha sido fabricada con cable Litz con un AWG 15.

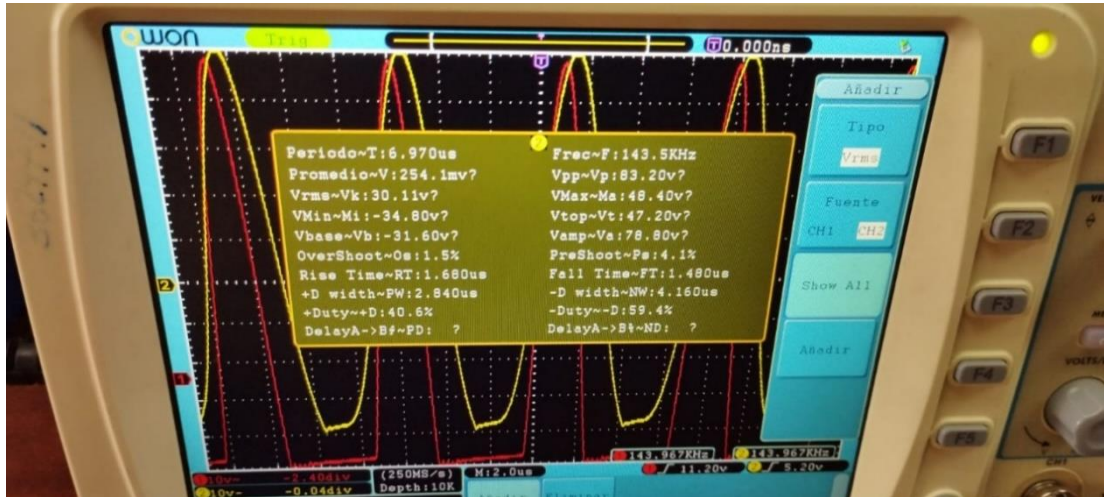


Figura N1. Datos de la bobina Receptora

Por otra parte, en la Figura N2, se muestran los datos obtenidos de la bobina Transmisora que de la misma manera está fabricada con cable Litz con un AWG 15.

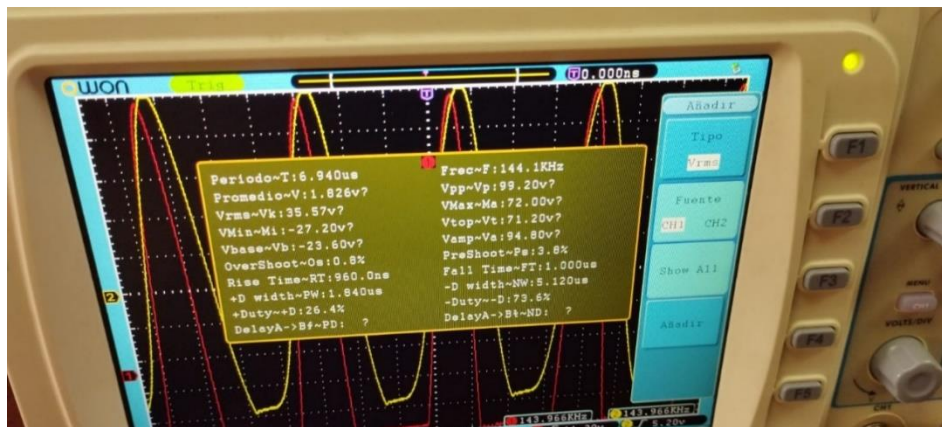


Figura N2. Datos de la bobina Transmisora

Anexo O. IV Feria Tecnológica FISEI 2024

En la Figura O1 se presenta la exposición en la IV Feria Tecnológica FISEI 2024, del sistema de carga inalámbrica utilizando tecnología inteligente para vehículos aéreos no tripulados.

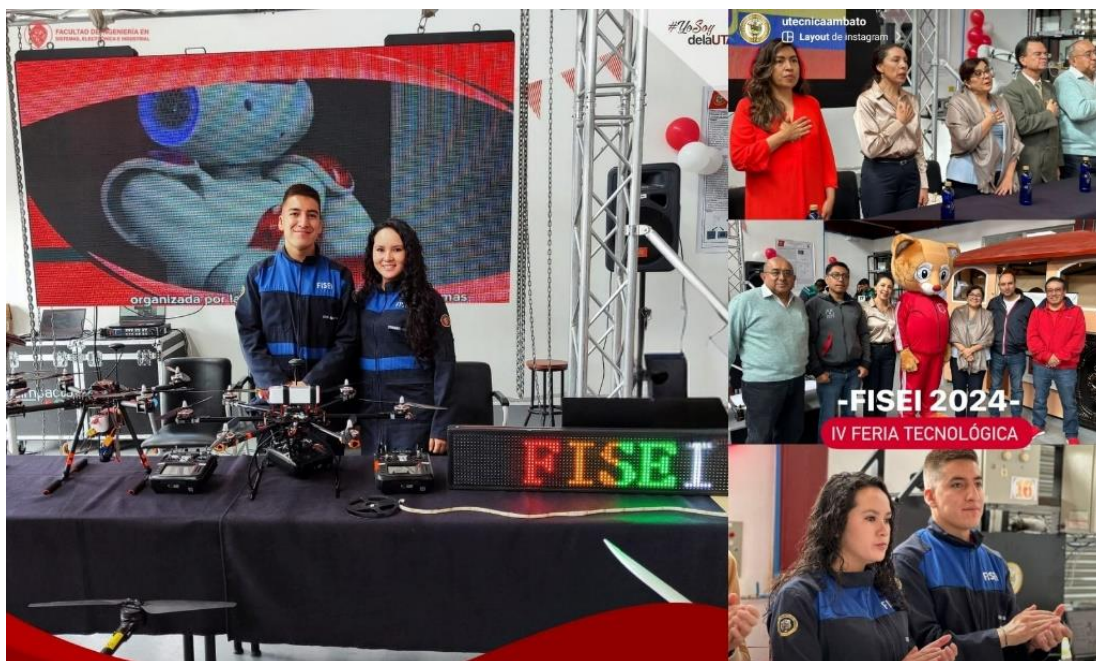


Figura O1. IV Feria Tecnológica FISEI 2024

Anexo P. Colaboración con la CIDFAE

En la Figura P1 se presenta una colaboración con la CIDFAE en procesos de investigación pruebas de vuelo de los UAV.



Figura P1. Colaboración con la CIDFAE