

# Capítulo 2

---

## Una propuesta de alternador para vant multirotor

*José Luis Cervantes González<sup>1</sup>*  
*Isaac Alfredo Ochoa Segundo<sup>2</sup>*  
*Gilberto Bojórquez Delgado<sup>3</sup>*

<https://doi.org/10.61728/AE24004510>



---

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Indígena de México. Email: joseluis.cervantes81@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Indígena de México. Email: profeisaacsegundo@gmail.com

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México – ITS Guasave, Sinaloa, México. Email: itsg.gbojorquez@gmail.com

## Resumen

Este estudio explora la viabilidad de integrar un alternador como fuente primaria de energía en vehículos aéreos no tripulados (VANT) multirrotores, considerando que estos han ganado popularidad en diversas aplicaciones como vigilancia, cartografía y servicios de entrega, aunque su eficiencia operativa se ve limitada por la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías de polímero de litio (Li-Po). Para abordar esta limitación, se propone el uso de un alternador que convierte la energía mecánica en eléctrica como fuente principal de energía para los VANT, ya que su potencial para generar más energía de manera eficiente y fiable que las baterías podría extender significativamente los tiempos de vuelo y mejorar el rendimiento general del VANT. Las ventajas de los alternadores sobre las baterías tradicionales incluyen una mayor generación de energía, mejor eficiencia en la conversión de energía y mayor fiabilidad, lo que se demuestra en el diseño de un sistema de energía híbrido que incorpora un motor de combustión acoplado a un alternador, además de baterías Li-Po como respaldo para asegurar un suministro continuo de energía. Los resultados experimentales evidencian la viabilidad de esta configuración, mostrando que el alternador puede proporcionar el voltaje necesario para una operación estable del VANT, lo cual promete mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los VANT, haciéndolos adecuados para misiones más largas y reduciendo la dependencia de las baterías tradicionales. Este enfoque innovador, al compararse con las soluciones energéticas existentes en la literatura, destaca el potencial de los alternadores para revolucionar la gestión de energía en los VANT, allanando el camino hacia una aviación no tripulada más sostenible y eficiente.

## Introducción

La tecnología avanza a pasos agigantados, y el surgimiento reciente de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), forma parte de esos avances que ha revolucionado en los últimos años distintos quehaceres relacionados con la comunicación, monitoreo del espacio, seguridad ciudadana, agricultura y tráfico automotor, entre otros (Montilla Pacheco et al., 2021).

Los VANT se han vuelto cada vez más populares en los últimos años para diversas aplicaciones, como vigilancia, cartografía y servicios de entrega. Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrentan los VANT es el tiempo limitado de vuelo debido a la limitada capacidad de almacenamiento de energía de las baterías convencionales. Para superar este desafío, el uso de alternadores como fuentes de energía primarias ha ganado una atención significativa en la industria de los vehículos aéreos no tripulados.

Según Márquez (2018), el uso principal de los VANT está enfocado en el campo militar, en misiones de reconocimiento. Por otro lado, los VANT tienen usos muy variados, como por ejemplo, publicidad, pesca, construcción, búsqueda de personas, prevención de incendios forestales, construcción, etc.

Otro uso que se le da a los VANT es la polinización el cual no es un tema común pero Montilla Pacheco et al., (2021), nos habla sobre un uso para los VANT el cual no está muy explorado, aquí hay una ventana de oportunidad para que la tecnología ayude al sector agrícola. Cada vez hay menos insectos que puedan hacer la polinización a la escala que se requiere y aquí es donde entran los VANT.

La energía que se necesita para que un VANT pueda volar, es mediante baterías de Polímero de Litio (Li-Po), las cuales no requieren de mantenimiento, son 20 % más ligeras que otro tipo de baterías de la misma capacidad, además una gran densidad energética comúnmente en el rango de 115 a 165 Wh/kg., el rango de descarga por no usarlas es de aproximadamente 5 % por mes (Khan et al., 2021).

Un alternador es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica (Real Academia Española, s. f., definición 1). Se utiliza habitualmente en vehículos para cargar la batería y alimentar el sistema

eléctrico. En los vehículos aéreos no tripulados, se puede utilizar un alternador como fuente de energía primaria generando electricidad para alimentar los motores y otros componentes eléctricos. Las ventajas de utilizar un alternador sobre baterías convencionales como fuente de energía principal en un VANT son numerosas. En primer lugar, los alternadores pueden generar más energía que las baterías, lo que significa tiempos de vuelo más prolongados. En segundo lugar, los alternadores son más eficientes que las baterías a la hora de convertir energía, lo que significa que se desperdicia menos energía. En tercer lugar, los alternadores son más fiables que las baterías, ya que no se degradan con el tiempo y la potencia de salida es constante.

Un sistema de respaldo de baterías es una fuente de energía secundaria que se utiliza cuando la fuente de energía primaria falla o no puede suministrar la energía requerida. Las ventajas de contar con un sistema de respaldo de batería en un VANT son importantes. En primer lugar, proporciona redundancia, lo que significa que el VANT puede seguir funcionando incluso si falla la fuente de energía principal. En segundo lugar, proporciona una red de seguridad, lo que significa que el VANT puede aterrizar de forma segura en caso de emergencia. Por último, proporciona flexibilidad, lo que significa que el VANT puede diseñarse para funcionar en diversas condiciones, como poca luz o viento fuerte, sin comprometer la seguridad o el rendimiento. La comparación de los sistemas de respaldo de batería con sistemas de respaldo alternativos, como las celdas de combustible, muestra que los sistemas de respaldo de batería son más confiables, eficientes y rentables.

Existen alternativas para las baterías que actualmente se siguen estudiando (Depcik et al., 2020), como mejores baterías de Iones de Litio (Li-Ion), motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno y celdas de hidrógeno para poder aumentar la autonomía de vuelo.

Un VANT que tenga dos tipos de alimentación energética puede ser muy beneficioso para el tiempo de vuelo y que no dependa 100 % de las baterías (He et al., 2020).

Al diseñar un sistema de integración para un alternador dentro de aplicaciones del VANT, se deben considerar los requisitos de energía únicos de estos vehículos aéreos. Un diseño típico podría incorporar un motor

de combustión acoplado a un alternador que genera la corriente eléctrica necesaria. Esta configuración es fundamental ya que los VANT, al igual que sus homólogos de vehículos terrestres, requieren una fuente confiable de electricidad para diversas funciones, desde la propulsión hasta la gestión de sistemas a bordo. El alternador, en particular, desempeña un papel crucial, ya que convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica, asegurando que las baterías del VANT estén constantemente cargadas durante el vuelo. También es importante tener en cuenta que el alternador debe ser capaz de entregar su potencia nominal incluso a regímenes de bajas revoluciones, lo que resulta especialmente ventajoso para los vehículos aéreos no tripulados que pueden operar a velocidades variables o flotar en el lugar, imitando la naturaleza intermitente de las ciudades. Tráfico de vehículos. Esta característica es esencial para mantener la estabilidad del suministro de energía, independientemente de la velocidad operativa del VANT, garantizando así el rendimiento ininterrumpido de la misión y la confiabilidad general del sistema.

El documento está estructurado en siete apartados: el primero consiste en la presente introducción; el segundo, se ven los trabajos relacionados; el tercero, aborda el marco teórico; el cuarto, presenta la propuesta; el quinto, detalla la experimentación; y finalmente, en el sexto expone las conclusiones y referencias en las que está sustentada la investigación.

## **Trabajos relacionados**

La investigación en VANT ha alcanzado hitos significativos, impulsando innovaciones en diversas aplicaciones desde la seguridad hasta la gestión ambiental. A pesar de estos avances, persisten retos críticos que limitan su plena integración y eficiencia. Este trabajo revisa los desarrollos recientes y examina las áreas que presentan oportunidades para innovaciones futuras, destacando la importancia de superar las limitaciones actuales para ampliar las capacidades y aplicaciones de los VANT.

Zhang et al. (2022) describe un estudio detallado sobre los sistemas híbridos de suministro de energía electroquímica y las estrategias de gestión de energía inteligente para vehículos aéreos no tripulados (VANT) en servicios públicos. Cubre clasificaciones y aplicaciones de VANT,

sistemas de suministro de energía como células de combustible, baterías y células solares, y aborda estrategias de gestión energética inteligente, incluyendo control basado en reglas, gestión optimizada y aprendizaje automático. El documento también discute la importancia de seleccionar una estructura híbrida adecuada para la operación eficiente de los VANT y proporciona perspectivas sobre el futuro de estos sistemas.

El desarrollo de sistemas de energía para vehículos aéreos no tripulados es un desafío importante que debe abordarse. Uno de los principales desafíos es la necesidad de vuelos prolongados a largas distancias. Esto requiere el uso de sistemas de energía eficientes y confiables que puedan sostener el tiempo de vuelo del VANT. El uso de fuentes de energía renovables como la solar o la eólica es una posible solución para ampliar el tiempo de misión. Sin embargo, la tecnología detrás de los sistemas de recolección y almacenamiento de energía de los VANT está en constante evolución. Se espera que las tecnologías emergentes, como las pilas de combustible de hidrógeno y los sistemas eléctricos híbridos, mejoren la potencia y la fiabilidad de los drones en el futuro. A pesar de las tecnologías prometedoras, el desarrollo de sistemas de energía para vehículos aéreos no tripulados sigue siendo un desafío importante que requiere esfuerzos continuos de investigación y desarrollo.

De Wagter et al. (2021) detallan el desarrollo y las pruebas de un VANT híbrido alimentado por hidrógeno, diseñado para despegue y aterrizaje vertical (VTOL) y vuelo eficiente en modo avión. Destaca la selección e integración de sistemas de hidrógeno, incluyendo celdas de combustible y almacenamiento, y enfatiza en la seguridad y eficiencia energética. Se presenta el diseño del VANT, sus características aerodinámicas, electrónica y control de vuelo, y se muestra los resultados de pruebas de vuelo, incluyendo un vuelo de 3 horas y 38 minutos en condiciones marítimas. Además, se discuten los desafíos y ventajas del uso de hidrógeno como fuente de energía en VANT.

Apeland et al. (2021) abordan un análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño en drones multirrotor alimentados por pilas de combustible. El estudio se centra en cómo diversos factores, como la configuración del sistema de propulsión, la masa y la energía específica, influyen en el rendimiento de los drones. También se discuten las implicaciones de las

mejoras en las baterías, la presión de hidrógeno y el grado de hibridación en el sistema de energía. El documento proporciona orientación para el diseño óptimo de sistemas de energía en drones multirotor, considerando diferentes configuraciones y tecnologías.

Zhang et al., (2021) aborda la optimización del sistema de propulsión eléctrico para VANT híbridos. Se centra en mejorar la capacidad del VANT para resistir perturbaciones del viento en el modo quadrotor. El estudio utiliza un enfoque de optimización multidisciplinaria, integrando varios aspectos de diseño para lograr un sistema óptimo. Se modelan y analizan diferentes módulos, como el sistema de propulsión, la resistencia al viento y la eficiencia energética. El documento concluye con la validación de la metodología propuesta a través de pruebas de vuelo y comparaciones con resultados teóricos.

## **Marco teórico**

El desarrollo de VANT se ha apoyado tradicionalmente en baterías como su principal fuente de energía, limitando su autonomía y eficiencia en aplicaciones prolongadas. Sin embargo, la creciente demanda de sistemas más sostenibles y de mayor duración ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas. En este contexto, el marco teórico de nuestra investigación se centra en el análisis de las tecnologías de generación de energía alternativas, con especial atención en el uso de alternadores para la alimentación de VANT. Este marco explora los principios de la generación de energía eléctrica mediante alternadores, las adaptaciones necesarias para su integración en VANT, y el impacto potencial de esta innovación en la autonomía y sostenibilidad de las operaciones aéreas no tripuladas. Al revisar las bases teóricas y los desarrollos tecnológicos relacionados, establecemos las bases para comprender cómo la integración de un alternador puede representar un avance significativo hacia el diseño de VANT más eficientes y ecológicos.

Según Zhang et al., (2021), el creciente interés en vehículos aéreos no tripulados (VANT) eléctricos se deben a su capacidad para realizar tareas difíciles o peligrosas, así como numerosos servicios públicos como monitoreo en tiempo real, cobertura inalámbrica, búsqueda y rescate, estudios

de vida silvestre y agricultura de precisión. Sin embargo, el principal desafío radica en el sistema de suministro de energía electroquímico de los VANT, especialmente en términos de densidades de energía/potencia y la durabilidad para la resistencia del servicio.

También detalla que un solo tipo de fuente de energía electroquímica es insuficiente para soportar vuelos de larga duración de los VANT, lo que hace necesaria la arquitectura de un sistema de energía híbrido. Para aprovechar las ventajas de cada tipo de fuente de energía, con el objetivo de aumentar la resistencia y lograr un buen rendimiento, se deben desarrollar sistemas híbridos que contengan dos o tres tipos de fuentes de energía (celdas de combustible, baterías, células solares y supercapacitores). La selección de una estructura de energía híbrida apropiada junto con un sistema de gestión de energía optimizado es crucial para la operación eficiente de un VANT. Se ha encontrado que los modelos impulsados por datos con inteligencia artificial (IA) son prometedores en la gestión inteligente de la energía, lo que puede proporcionar ideas y pautas para futuras investigaciones y desarrollos en el diseño y fabricación de sistemas de energía avanzados para VANT.

Se discute la importancia de la hibridación de fuentes de energía y las estrategias de gestión energética inteligente. La integración de tecnologías avanzadas y estrategias de gestión energética adaptativas promete superar las limitaciones actuales, mejorando la eficiencia del vuelo y reduciendo el consumo de combustible. La investigación futura en optimización multiobjetivo basada en aprendizaje automático se identifica como un camino prometedor para el desarrollo de sistemas de propulsión híbridos en VANT, apuntando a una mejora sustancial en la operación y la sostenibilidad de estas plataformas en aplicaciones de servicio público. Este enfoque holístico hacia la revisión de tecnologías de suministro de energía y gestión en VANT resalta la complejidad y la interdisciplinariedad del campo, subrayando la necesidad de innovación continua y adaptación a nuevos desafíos y oportunidades en el desarrollo y aplicación de VANT en el sector público.

De Wagter et al., (2021) se centra en el desarrollo y la evaluación del NederDrone, un vehículo aéreo no tripulado (VANT) híbrido impulsado por hidrógeno, diseñado para combinar las ventajas de los VANT de despegue

y aterrizaje vertical (VTOL) con las eficiencias de vuelo de alas fijas. Este VANT utiliza una combinación de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) alimentadas por hidrógeno para la resistencia y baterías de litio para situaciones de alta demanda de energía, almacenando el hidrógeno en un cilindro presurizado. El documento detalla el proceso de selección de concepto, los aspectos de seguridad implementados, la electrónica, el control de vuelo y presenta datos de vuelo reales, incluido un vuelo significativo sobre el mar, destacando la capacidad del VANT para despegar y aterrizar desde un barco en movimiento.

La necesidad de un sistema híbrido de suministro de energía surge de las limitaciones de las baterías actuales para satisfacer los requisitos de energía de muchas aplicaciones de VANT, especialmente aquellas que requieren capacidades VTOL. Los VANT híbridos, que combinan alas fijas eficientes con la capacidad de volar en estacionario de los vehículos de rotor, ofrecen una solución prometedora al permitir tanto el vuelo eficiente a larga distancia como la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente en espacios confinados.

El NederDrone aprovecha las celdas de combustible PEM, que son ideales para sistemas portátiles micro debido a su tamaño compacto, peso ligero y funcionamiento a temperatura ambiente. Aunque el hidrógeno es un combustible ideal por su alta densidad energética y su combustión limpia, el almacenamiento de hidrógeno presenta desafíos significativos, especialmente en términos de peso y forma del cilindro de presión necesario para almacenarlo.

Para superar las limitaciones de potencia de las celdas de combustible y satisfacer las demandas de energía durante el vuelo estacionario y otras fases de alta demanda de energía, el NederDrone integra baterías de litio de alta capacidad. Esta integración se realiza de manera pasiva, conectando las fuentes de energía en paralelo sin la necesidad de electrónica de potencia pesada, aprovechando un enfoque que maximiza la eficiencia y la redundancia del sistema.

El control del NederDrone se basa en un enfoque de inversión dinámica no lineal incremental (INDI), que no depende en gran medida de la modelación aerodinámica y utiliza una aproximación basada en sensores para identificar las fuerzas externas actuantes sobre el vehícu-

lo. Este método de control ha demostrado ser efectivo para manejar las dinámicas complejas y las perturbaciones externas que enfrentan los VANT de tipo tail-sitter durante el vuelo, particularmente en el modo de vuelo estacionario y durante las transiciones entre vuelo estacionario y vuelo hacia adelante.

El desarrollo del NederDrone ilustra un enfoque integrado para abordar los desafíos de diseño, energía y control de los VANT híbridos, destacando el potencial de los sistemas de energía híbrida basados en hidrógeno para mejorar significativamente la resistencia y la versatilidad de los VANT en una variedad de aplicaciones.

Según Apeland et al., (2021) realiza un estudio exhaustivo sobre el uso de sistemas híbridos de células de combustible para mejorar la autonomía y el rendimiento de los drones multirrotor. Se centra en analizar cómo los diferentes parámetros de diseño afectan el rendimiento de un dron multirrotor X8 equipado con un sistema híbrido de células de combustible de 2 kW. Se destaca que, a diferencia de las baterías de iones de litio tradicionales, los sistemas híbridos de células de combustible pueden ofrecer una densidad energética significativamente mayor, lo que se traduce en tiempos de vuelo prolongados.

Se discute la necesidad de un diseño cuidadoso del sistema para maximizar las ventajas de rendimiento, dado que los drones multirrotor tienen perfiles de carga más dinámicos y demandantes en comparación con los VANT de ala fija. Además, se abordan las barreras técnicas, regulatorias y operativas para la adopción de células de combustible en drones, destacando la importancia de superar estos desafíos para mejorar la propuesta de valor de los drones alimentados por células de combustible.

La investigación incluye un análisis de sensibilidad que examina el impacto de parámetros clave del sistema, como la configuración del sistema de propulsión, la sensibilidad de la masa, la energía específica y el grado de hibridación. Se utilizan datos experimentales para desarrollar un modelo empírico de consumo de energía, lo que mejora la validez del estudio de sensibilidad. Este enfoque proporciona orientación en las etapas conceptuales tempranas y ofrece perspectivas sobre cómo se pueden mejorar y optimizar los sistemas de potencia basados en células de combustible para multirrotos.

Se presentan ejemplos de drones multirotor alimentados por células de combustible en uso y en desarrollo, destacando sus capacidades y el potencial de las células de combustible para extender la duración del vuelo y la autonomía. La discusión también abarca la importancia de considerar la eficiencia del sistema de propulsión, la sensibilidad de la masa y la energía específica en el diseño de sistemas de energía para drones, así como los desafíos y oportunidades para una mayor adopción de células de combustible en aplicaciones de drones.

Zhang et al. (2021) proporciona una investigación exhaustiva sobre la optimización del diseño multidisciplinario (MDO) de un sistema de propulsión eléctrica (EPS) para un VANT híbrido, centrándose en su capacidad para rechazar perturbaciones del viento en modo cuadricóptero. Este VANT híbrido combina los modos de propulsión cuadricóptero para el vuelo vertical y ala fija para el vuelo de crucero, enfrentando desafíos únicos debido a la asimetría lateral y el área expuesta al viento en el modo cuadricóptero, lo que lo hace susceptible a las perturbaciones del viento cruzado. El estudio destaca la importancia de considerar la capacidad de rechazo de perturbaciones del viento en el diseño del EPS, lo que es crucial para garantizar un vuelo seguro y estable.

La metodología MDO aplicada busca optimizar el peso y la eficiencia del EPS al tiempo que mejora la capacidad de rechazo del viento, utilizando un enfoque integral que considera varios componentes del EPS, como el propulsor/rotor, el motor de corriente continua sin escobillas (BLDC), el control electrónico de velocidad (ESC) y la batería de polímero de litio (LIPO). Esta metodología aborda las limitaciones de los métodos de diseño tradicionales que suelen tratar los sistemas de propulsión cuadricóptero y ala fija de manera independiente, sin considerar la capacidad de rechazo de perturbaciones del viento, lo que puede llevar a diseños subóptimos con exceso de peso y consumo de energía.

Revela un conflicto inherente entre los objetivos de diseño del EPS, incluyendo la capacidad de rechazo de perturbaciones del viento, la masa del EPS y su eficiencia, lo que requiere un equilibrio cuidadoso y compromisos entre diferentes actuaciones. Utiliza un procedimiento de optimización multiobjetivo para identificar un conjunto de soluciones

óptimas de Pareto, de las cuales se seleccionan configuraciones específicas basadas en requisitos de aplicación práctica, como la capacidad de operar de manera segura en brisas moderadas.

El estudio concluye con la validación de los resultados de optimización a través de pruebas de vuelo, demostrando que el rendimiento en vuelo del VANT está en línea con las expectativas, lo que confirma la viabilidad y razonabilidad del método MDO propuesto. Este enfoque no solo tiene implicaciones significativas para el diseño de VANT híbridos cuadricóptero-ala fija, sino que también puede ser relevante para una amplia gama de configuraciones de VANT eléctricos, ofreciendo una valiosa referencia para el diseño del EPS en otras configuraciones de VANT.

Además, anticipa investigaciones futuras para considerar la perturbación del viento turbulento tridimensional y la respuesta dinámica del EPS en el diseño, con el objetivo de mejorar aún más la capacidad de rechazo de perturbaciones del viento y optimizar el rendimiento aerodinámico del VANT bajo diversas condiciones ambientales.

## **Metodología**

Los avances en la tecnología de vehículos aéreos no tripulados han sido impulsados por diversos métodos para la obtención de energía, que van desde el uso de celdas de hidrógeno hasta supercapacitores, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Sin embargo, este estudio se propone un enfoque verdaderamente innovador al integrar un alternador como fuente primaria de energía. Esta propuesta representa un salto cualitativo en la sostenibilidad y eficiencia energética de los VANT, marcando un hito significativo en su diseño y funcionalidad.

Al utilizar la energía generada durante el vuelo, este sistema no solo promete prolongar de manera considerable la autonomía de los VANT, sino también mejorar su capacidad de carga y su tiempo de operación de forma sin precedentes. Esta innovación abre un abanico de nuevas posibilidades para aplicaciones en misiones de larga duración, como el monitoreo ambiental y la vigilancia, al tiempo que reduce drásticamente la dependencia de las baterías tradicionales y minimiza el impacto ambiental negativo asociado con su uso.

Este proyecto no solo busca avanzar en el ámbito de la aviación no tripulada, sino también establecer un nuevo referente para el diseño y la operación de VANT en el futuro.

Esta investigación representa un avance tecnológico de gran importancia y marca un paso significativo hacia un futuro más sostenible y eficiente en términos energéticos para la aviación no tripulada.

Al diseñar un sistema de integración para un alternador dentro de aplicaciones del VANT, se deben considerar los requisitos de energía únicos de estos vehículos aéreos. Un diseño típico podría incorporar un motor de combustión acoplado a un alternador que genera la corriente eléctrica necesaria. Esta configuración es fundamental ya que los VANT, al igual que sus homólogos de vehículos terrestres, requieren una fuente confiable de electricidad para diversas funciones, desde la propulsión hasta la gestión de sistemas a bordo. El alternador, en particular, desempeña un papel crucial, ya que convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica, asegurando que las baterías del VANT estén constantemente cargadas durante el vuelo. También es importante tener en cuenta que el alternador debe ser capaz de entregar su potencia nominal incluso a regímenes de bajas revoluciones, lo que resulta especialmente ventajoso para los vehículos aéreos no tripulados que pueden operar a velocidades variables o flotar en el lugar, imitando la naturaleza intermitente de las ciudades. Esta característica es esencial para mantener la estabilidad del suministro de energía, independientemente de la velocidad operativa del VANT, garantizando así el rendimiento ininterrumpido de la misión y la confiabilidad general del sistema.

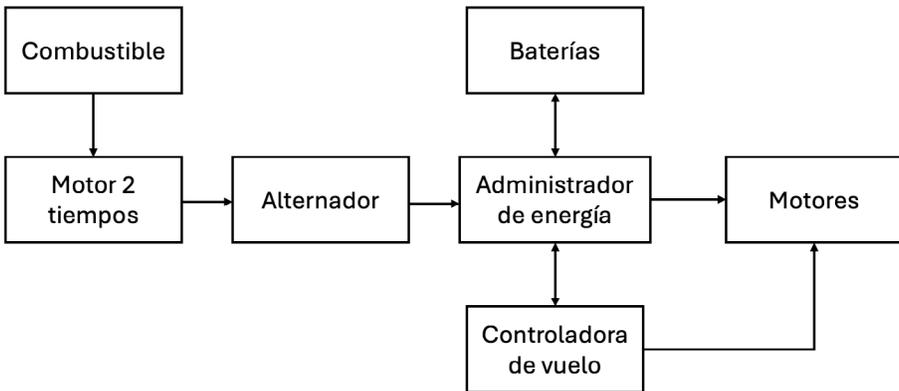
En la gestión de energía dentro de los VANT las baterías desempeñan un papel fundamental como respaldo del alternador, asegurando un suministro constante de energía en diversos escenarios operativos. Por ejemplo, el alternador, tiene la tarea de generar la corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento del vehículo. Esta corriente eléctrica se produce de manera eficiente a bajas revoluciones por minuto (RPM), lo que la convierte en una opción adecuada para vehículos aéreos no tripulados que pueden operar a velocidades variables o en condiciones en las que las revoluciones por minuto del motor pueden no ser consistentemente altas. Sin embargo, en situaciones en las que la salida

del alternador puede fallar o cuando se requiere energía adicional, las baterías del VANT son a prueba de fallas e intervienen para mantener el suministro de energía sin interrupciones. Este cambio continuo a la energía de la batería es fundamental, particularmente durante misiones prolongadas o en caso de un mal funcionamiento del alternador, lo que garantiza que no se comprometan las capacidades operativas del VANT. Por lo tanto, el papel de la batería como respaldo no es solo una función auxiliar sino un aspecto central de la resistencia y confiabilidad de un VANT en diversas condiciones de vuelo.

En la figura 1 se describe el funcionamiento completo del sistema de alimentación de energía para un VANT utilizando un alternador como fuente primaria de energía, el combustible es nitrometano, este combustible es el ideal para el motor de 2 tiempos, este a su vez mueve el alternador generando así la energía necesaria para todo el sistema.

**Figura 1**

*Diagrama del alternador implementado en un VANT.*



A continuación se detalla el funcionamiento de cada bloque:

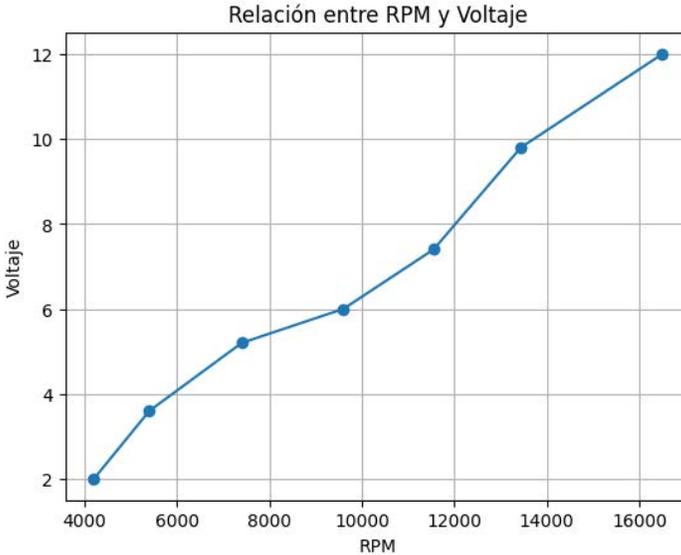
- **Combustible:** Nitrometano 20 %, aceite 14 %, también conocido como “Nitro” es una mezcla de 3 componentes:
  - **Metanol:** Libera más energía que la gasolina por libra, es muy fácil de encender con una bujía incandescente.
  - **Nitrometano:** Ayuda a aumentar la potencia, el resultado es más caballos de fuerza y revoluciones más altas.

- **Aceite:** Se mezcla con el combustible al 14 % para lubricar el motor.
- **Motor 2 tiempos:** Motor HSP 02060 VX 18, 2.74 cc, RC 1/10, el cual será el encargado de hacer girar el alternador, es pequeño y muy eficiente.
- **Alternador:** Motor sin escobillas Turnigy G46, el cual es capaz de generar la energía necesaria para todo el sistema eléctrico del VANT.
- **Baterías:** El VANT requiere una batería Li-po de 4 a 6 celdas (4S-6S) a 5000mAh, la cual será utilizada como respaldo en caso de que el alternador se detenga por alguna falla inesperada.
- **Administrador de energía:** Este es el sistema que convierte la corriente alterna (AC) a corriente directa (DC) para la alimentación del VANT, también se encarga de hacer el cambio de manera autónoma de funcionamiento con alternador a baterías.
- **Controladora de vuelo:** Es donde se encuentra el centro neurálgico del VANT y se encarga de entregar los pulsos necesarios a los motores del VANT.
- **Motores:** Son lo que impulsan al VANT.

En la figura 2 podemos apreciar el voltaje generado en relación a las revoluciones del alternador, el VANT requiere al menos 12 V para tener un vuelo estable, las RPM (revoluciones por minuto) fueron medidas con un tacómetro.

**Figura 2**

Voltaje generado por el alternador.



## Resultados

Los resultados de esta investigación demuestran la viabilidad de integrar un alternador como fuente primaria de energía en VANT multirroto, evidenciando que el sistema propuesto, compuesto por un motor de combustión interna acoplado a un alternador, es capaz de generar y mantener un suministro constante de energía eléctrica suficiente para un vuelo estable. Durante las pruebas, el alternador mantuvo consistentemente una salida de 12 V bajo carga, superando en eficiencia energética a las baterías tradicionales y permitiendo tiempos de vuelo más largos. Además, el alternador mostró ser capaz de entregar su potencia nominal incluso a bajas RPM, asegurando la estabilidad del VANT en diversas condiciones operativas. A diferencia de las baterías Li-Po, que tienden a degradarse con el tiempo, el alternador mantuvo una salida de potencia constante, lo que sugiere un menor requerimiento de mantenimiento y mayor longevidad del sistema. La inclusión de baterías como respaldo añadió una capa adicional de seguridad, garantizando la operación continua del VANT en caso de fallo del alternador o en situaciones de alta

demanda energética, lo que valida la propuesta de esta investigación y abre nuevas posibilidades para su aplicación en misiones más exigentes y de mayor duración.

## Discusión

El análisis de los resultados obtenidos con la implementación de un alternador como fuente primaria de energía en VANT multirotor revela ventajas significativas respecto a las tecnologías tradicionales basadas en baterías de polímero de litio (Li-Po). Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Zhang et al., (2022) quien destaca la necesidad de sistemas híbridos de suministro de energía para mejorar la eficiencia y la duración del vuelo de los VANT. La propuesta de un sistema que integra un alternador con baterías de respaldo responde a esta necesidad, proporcionando una solución que permite una generación continua de energía, lo cual es crucial para misiones prolongadas y exigentes. Por otro lado, estudios como el de Wagter et al., (2021) y Apeland et al., (2021) enfatizan la importancia de contar con fuentes de energía redundantes para maximizar la autonomía y fiabilidad de los VANT. En este sentido, la combinación de un alternador con un sistema de baterías de respaldo ofrece una respuesta eficiente a los desafíos identificados en dichas investigaciones. A pesar de que existen tecnologías emergentes, como las celdas de hidrógeno Depcik et al., (2020) y He et al., (2020), que también buscan mejorar la autonomía y eficiencia, el alternador propuesto en este estudio presenta una solución intermedia más fácilmente integrable con la tecnología actual, lo que podría facilitar su adopción en el corto plazo. Además, la implementación de un administrador de energía que optimiza la conversión de corriente y la transición entre fuentes de energía, como sugiere Zhang et al. (2022), asegura un rendimiento óptimo y continuo del sistema, alineándose con las estrategias de gestión energética inteligente recomendadas en la literatura reciente.

## Conclusión

La integración de un alternador como fuente primaria de energía en los VANT multirotor se demuestra como una solución viable y prometedora para superar las limitaciones actuales de las baterías de polímero de litio

(Li-Po). Este enfoque no solo extiende significativamente el tiempo de vuelo de los VANT, sino que también mejora la eficiencia energética y la fiabilidad operativa, al proporcionar una fuente de energía constante que no se degrada con el tiempo. Los resultados experimentales indican que el alternador puede generar la energía necesaria de manera más eficiente y confiable, lo cual posiciona esta tecnología como una opción viable para su implementación en misiones que requieren una alta autonomía y fiabilidad. En resumen, la propuesta desarrollada en este estudio ofrece una solución innovadora que contribuye al avance de la tecnología de VANT hacia sistemas más sostenibles y eficientes, adaptándose a las demandas actuales y futuras de la aviación no tripulada.

Estas modificaciones permiten que el artículo cumpla con la observación recibida, separando claramente la discusión comparativa de la literatura de las conclusiones específicas de los resultados obtenidos en el estudio.

## **Trabajo futuro**

El trabajo futuro para la investigación sobre el uso de alternadores como fuente primaria de energía en VANT se centrará en varias áreas clave para mejorar la eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad de esta tecnología. En primer lugar, se investigará la optimización del diseño del alternador, desarrollando dispositivos más eficientes y ligeros específicamente diseñados para aplicaciones en VANT. Se estudiará la integración de materiales avanzados que puedan mejorar la eficiencia energética y reducir el peso del alternador.

La gestión inteligente de energía es otra área crucial para el futuro de esta investigación. Se desarrollarán sistemas avanzados de gestión de energía utilizando inteligencia artificial y aprendizaje automático, lo que permitirá optimizar la distribución y el uso de la energía en tiempo real. Esto contribuirá a maximizar la autonomía y eficiencia del VANT durante el vuelo.

Para validar la viabilidad y eficiencia del sistema de alternador, se realizarán pruebas extensivas en escenarios de vuelo reales y misiones específicas. La recopilación y análisis de datos de estas pruebas proporcionará información valiosa para mejorar el diseño y funcionamiento del sistema.

Por último, se investigarán las normativas y regulaciones aplicables al uso de alternadores en VANT. Trabajar en el desarrollo de estándares industriales para su implementación segura y eficiente será esencial. Colaborar con organismos reguladores y la industria asegurará el cumplimiento de las normativas y promoverá la adopción de esta tecnología.

Estas áreas de trabajo futuro no solo ayudarán a mejorar la eficiencia y fiabilidad de los VANT, sino que también contribuirán al desarrollo de soluciones energéticas más sostenibles y avanzadas en la aviación no tripulada.

## Referencias

- Diccionario de la lengua española RAE - ASALE. (s. f.). Alternador  
Recuperado el 12 de agosto de 2024, de <https://dle.rae.es/alternador>
- Apeland, J., Pavlou, D. G., & Hemmingsen, T. (2021). Sensitivity Study of Design Parameters for a Fuel Cell Powered Multirotor Drone. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 102(1). <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01363-9>
- De Wagter, C., Remes, B., Smeur, E., van Tienen, F., Ruijsink, R., van Hecke, K., & van der Horst, E. (2021). The NederDrone: A hybrid lift, hybrid energy hydrogen UAV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29), 16003–16018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.053>
- Depcik, C., Cassady, T., Collicott, B., Burugupally, S. P., Li, X., Alam, S. S., Arandia, J. R., & Hobeck, J. (2020). Comparison of lithium ion Batteries, hydrogen fueled combustion Engines, and a hydrogen fuel cell in powering a small Unmanned Aerial Vehicle. *Energy Conversion and Management*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112514>
- He, C., Jia, Y., & Ma, D. (2020). Optimization and Analysis of Hybrid Electric System for Distributed Propulsion Tilt-Wing UAV. *IEEE Access*, 8, 224654–224667. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044449>
- Khan, M. A., Khan, A., Ahmad, M., Saleem, S., Aziz, M. S., Hussain, S., & Khan, F. M. (2021). A Study on Flight Time Enhancement of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Using Supercapacitor-Based Hy-

- brid Electric Propulsion System (HEPS). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1179–1198. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04941-5>
- Márquez Díaz, J. E. (2018). Seguridad metropolitana mediante el uso coordinado de Drones. *Revista Ingenierías USBMed*, 9(1), 39-48. (Ejemplar dedicado a: Ingenierías USBMed). <https://doi.org/10.21500/20275846.3299>
- Montilla-Pacheco, A. de J., Pacheco-Gil, H. A., Pastrán-Calles, F. R., Rodríguez-Pincay, I. R., Montilla-Pacheco, A. de J., Pacheco-Gil, H. A., Pastrán-Calles, F. R., & Rodríguez-Pincay, I. R. (2021). Polinización con drones: ¿Una respuesta acertada ante la disminución de polinizadores entomófilos? *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 509-516. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.055>
- Zhang, C., Qiu, Y., Chen, J., Li, Y., Liu, Z., Liu, Y., Zhang, J., & Hwa, C. S. (2022). A comprehensive review of electrochemical hybrid power supply systems and intelligent energy managements for unmanned aerial vehicles in public services. *Energy and AI*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100175>
- Zhang, H., Song, B., Li, F., & Xuan, J. (2021). Multidisciplinary design optimization of an electric propulsion system of a hybrid UAV considering wind disturbance rejection capability in the quadrotor mode. *Aerospace Science and Technology*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106372>